

Convenio Específico de colaboración

INVESTIGACIÓN DE PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS Y GEOMÉTRICOS EN ACUÍFEROS ALUVIALES DE LA CUENCA DEL EBRO MEDIANTE SONDEOS DE RESONANCIA MAGNÉTICA.

INFORME FINAL MEMORIA



IGME
Juan L. Plata
Félix Rubio
Antonio Azcón

CHE
Victor Arqued
Teresa Carceller
Jesús Serrano (ZA)

IGME, Tres Cantos, diciembre 2004

INVESTIGACIÓN DE PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS Y GEOMÉTRICOS EN ACUÍFEROS DETRÍTICOS DE LA CUENCA DEL EBRO MEDIANTE SONDEOS DE RESONANCIA MAGNÉTICA.

En la elaboración de este Informe han colaborado:

- **J.L. Plata:** proceso de datos, interpretación, cálculos, confección de gráficos y redacción del texto.
- **F.M. Rubio:** revisión de datos de Sondeos Eléctricos Verticales, preparación de los modelos geoelectricos y cálculo de las matrices para la inversión; preparación de ficheros de información cartográficos.
- **T. Carceller y J. Serrano:** recopilación y preparación de información hidrogeológica, descripción de acuíferos y suministro de soporte cartográfico georeferenciado.
- **A. Azcón:** revisión y recálculo de ensayos de bombeo y obtención de parámetros hidráulicos.

IGME, Tres Cantos, diciembre de 2004

Índice de la MEMORIA

0. Resumen y conclusiones

1. Antecedentes y objetivo

2. Interés, justificación y alcance del estudio planteado

3. Consideraciones sobre el proceso de medición e interpretación de los SRM

3.1 Fundamentos teóricos

3.2 Estimación de parámetros hidrodinámicos

3.3 Selección de parámetros de inversión

3.4 Presentación de los resultados

4. Plan y equipo de trabajo. Sumario de ejecución del Proyecto.

5. Área de trabajo

6. Instrumentación utilizada

7. Ejecución de las mediciones

8. Zona del Alto Jiloca

8.1 Hidrogeología de la zona

8.2 Toma de datos en campo

8.3 Matriz de inversión

8.4 Interpretación

8.5 Determinación de parámetros hidrodinámicos

8.5.1 Datos de partida

8.5.2 Procedimiento de cálculo del coeficiente de calibración

8.5.3 Calibración para la zona del Jiloca

8.5.4 Resultados de permeabilidad y transmisividad

8.5.5 Otras relaciones entre parámetros hidrodinámicos y valores determinados por SRM

9. Ensayo en el aluvial del río Gállego

10. Zona del aluvial del Oja o Glera

10.1 Hidrogeología de la zona

10.2 Toma de datos en campo

10.3 Matriz de inversión

10.4 Interpretación

10.5 Determinación de parámetros hidrodinámicos

10.5.1 Datos de partida

10.5.2 Calibración para la zona del Oja

10.5.3 Resultados de permeabilidad y transmisividad

10.5.4 Otras relaciones entre parámetros hidrodinámicos y valores determinados por SRM

11. Zona del Campo de Cariñena (Jalón, Almunia)

11.1 Hidrogeología de la zona

11.2 Toma de datos en campo

11.3 Matriz de inversión

11.4 Interpretación

11.5 Determinación de parámetros hidrodinámicos

11.5.1 Datos de partida

11.5.2 Calibración para la zona del Jalón

11.5.3 Resultados de permeabilidad y transmisividad

11.5.4 Otras relaciones entre parámetros hidrodinámicos y valores determinados por
SRM

12. Zona del aluvial del río Ebro (Cabañas)

12.1 Hidrogeología de la zona

12.2 Toma de datos en campo

12.3 Matriz de inversión

12.4 Interpretación

12.5 Determinación de parámetros hidrodinámicos

Índice de Figuras

Índice de ANEXOS

Glosario de símbolos utilizados

INDICE DE FIGURAS

3. Consideraciones sobre el proceso de medición e interpretación de los SRM

- 1 Esquema de registro y elaboración de los datos de un SRM
- 2 Resolución de las mediciones de SRM Resolución (potencia de las capas) obtenida en la inversión de un SRM, en función del número de momentos de emisión y de las dimensiones de la antena.
- 3 Consola de entrada de datos y parámetros de proceso de un SRM mediante el programa SAMOVAR

5. Area y equipo de trabajo

- 4a Mapa general de posición de campañas de SRM efectuadas
- 4b Posición de los Sondeos de Resonancia Magnética efectuados sobre el contorno de la Cuenca Hidrográfica del Ebro y su distribución en hojas 1:50.000 del MTN
- 4c Situación de las Unidades Hidrogeológicas sobre las que se ha llevado a acabo la campaña de Sondeos de Resonancia Magnética en la Cuenca de Ebro.

Fotografías

7. Ejecución de las mediciones

- 5a Ruido ambiental en nV para todos los SRM realizados en este Proyecto
- 5b Ruido ambiental en nV frente a la relación Señal/Ruido obtenida en los SRM realizados en este Proyecto

8. Zona del Alto Jiloca

- 6 Mapa de posición de los SRM en la zona del Jiloca. Hojas 1:50.000 nº 491, 516 y 541. Coordenadas UTM
- 7 Nivel de ruido ambiental medido en los SRM de la zona del Jiloca
- 8a Interpretación de la distribución del contenido en agua y de T_1 de los SRM Te27, Te26 y SGOP1, con indicación de las columnas litológicas, acuíferos y nivel piezométrico previamente disponibles. Para interpretación de los tiempos tener en cuenta que $T_1 = 1.5 T_2^*$. Los colores adjudicados a la litología se han elegido en correspondencia con el valor de la constante de tiempo, según se indica en el párrafo 3.4.
- 8b Interpretación de la distribución del contenido en agua y de T_1 de los SRM Te19, Te15, Te11 y Te34, con indicación de las columnas litológicas, acuíferos y nivel piezométrico previamente disponibles. Para interpretación de los tiempos tener en cuenta que $T_1 = 1.5 T_2^*$. Los colores adjudicados a la litología se han elegido en correspondencia con el valor de la constante de tiempo, según se indica en el párrafo 3.4.
- 8c Interpretación de la distribución del contenido en agua y de T_1 de los SRM Vi2, Te45, Te 44, Te42 y Te36, con indicación de las columnas litológicas, acuíferos y nivel piezométrico previamente disponible. Para interpretación de los tiempos tener en cuenta que $T_1 = 1.5 T_2^*$. Los colores adjudicados a la litología se han elegido en correspondencia con el valor de la constante de tiempo, según se indica en el párrafo 3.4.
- 9 Calibración de la transmisividad de los SRM de la zona del río Jiloca
- 10 Gráficos de distribución del contenido en agua-tamaño de grano, permeabilidad y transmisividad acumulada para los SRM de la zona del Jiloca.

- 11 Relación entre el caudal y parámetros de los SRM en la zona del Jiloca
- 12 Relación entre el nivel piezométrico medido en los pozos y determinados por SRM; otras relaciones de parámetros en el Jiloca.

9. Ensayo en el aluvial del río Gállego

- 13 Gráficos de distribución del contenido en agua-tamaño de grano, permeabilidad y transmisividad acumulada para el SRM 1027 medido en la zona del Gállego

10. Zona del aluvial del Oja o Glera

- 14 Mapa de posición de los SRM realizados en la zona del Oja. Hojas 1:50.000 nº 202 y 169. Coordenadas UTM
- 15 Nivel de ruido ambiental medido en los SRM de la zona del Oja.
- 16 Perfil de interpretación de la distribución del contenido en agua y de T_1 (tamaño del grano) de los SRM medidos en la zona del Oja, con indicación de las permeabilidades calculadas.
- 17 Calibración de la transmisividad en los SRM de la zona del Oja
- 18 Gráficos de distribución del contenido en agua-tamaño de grano, permeabilidad y transmisividad acumulada para los SRM de la zona del Oja.
- 19 Correlación entre caudales medidos en los pozos y parámetros de SRM
- 20 Relación entre el nivel piezométrico medido en los pozos y determinados por SRM; otras relaciones de parámetros.

11. Zona del Campo de Cariñena (Jalón, Almunia)

- 21 Posición de los SRM en la zona del Jalón. Hoja 1:50.000 nº 410. Coordenadas UTM
- 22 Ruido ambiental durante las mediciones de SRM en la zona del río Jalón.
- 23 Perfiles de interpretación de la distribución del contenido en agua y de T_1 (tamaño del grano) de los SRM medidos en la zona del Jalón, con indicación de las columnas litológicas de los pozos más próximos. Los colores adjudicados a la litología se han elegido en correspondencia con el valor de la constante de tiempo, según se indica en el párrafo 3.4. Se indica el npz medido.
- 24 Calibración de la transmisividad en la zona del Jalón.
- 25 Gráficos de distribución del contenido en agua-tamaño de grano, permeabilidad y transmisividad acumulada para los SRM de la zona del Jalón.
- 26 Relación entre parámetros de SRM. Correlación del nivel piezométrico medido y estimado por SRM.

12. Zona del aluvial del río Ebro (Cabañas)

- 27 Situación de los SRM realizados en la zona del Ebro (Cabañas). Hojas 1:50.000 nº 354.
- 28 Nivel de ruido ambiental medido en los SRM de la zona del Ebro (Cabañas).
- 29 Interpretación de la distribución del contenido en agua y de T_1 (tamaño del grano) de los SRM medidos en la zona del Ebro (Cabañas).
- 30 Calibración de la transmisividad en la zona del Ebro (Cabañas).
- 31 Resultados de permeabilidad y transmisividad acumulada en los SRM 1032 y 1034 del Ebro (Cabañas). Valores de alcance exclusivamente cualitativo sólo válidos para el primer tramo acuífero
- 32 Calibración de la transmisividad en la zona del Ebro (Cabañas) con los nuevos valores aportados de T_{eb}
- 33 Correlación entre parámetros determinados por SRM en la zona del Ebro

INDICE DE ANEXOS

I Convenio IGME-CHE

II Artículo “Sondeos de Resonancia Magnética (SRM). Ensayo en un acuífero detrítico del Sur de España”. Juan L. Plata, Felix M. Rubio. Boletín Geológico y Minero. Vol. 110-5. 1999.

III ZONA DEL ALTO JILOCA

- A- Plano de posición de los SRM sobre la cartografía geológica
- B- Situación de detalle de cada SRM sobre la ortofoto del GIS-Oleícola (MAPA)
- C- Columnas litológicas de los sondeos próximos a los SRM
- D- Gráficos de resultados de campo de los SRM: curvas de decaimiento $E(t)$, curvas de amplitud $E_0(q)$, $T_2^*(q)$, frecuencia $f(q)$, fase $\phi(q)$ y amplitud de ruido en función del momento, y distribución de agua en función de la profundidad.
- E- Ficheros de valores medidos y de resultados de la inversión
- F- Tablas de cálculo del coeficiente de calibración de la transmisividad

IV ZONA DEL ALUVIAL DEL GALLEGO

- A- Plano de posición del SRM sobre la cartografía geológica
- B- Situación de detalle del SRM sobre la ortofoto del GIS-Oleícola (MAPA)
- C- Gráficos de resultados de campo del SRM: curvas de decaimiento $E(t)$, curvas de amplitud $E_0(q)$, $T_2^*(q)$, frecuencia $f(q)$, fase $\phi(q)$ y amplitud de ruido en función del momento, y distribución de agua en función de la profundidad.
- D- Fichero de valores medidos y de resultados de la inversión
- E- Tabla de cálculo del coeficiente de calibración de la transmisividad

V ZONA DEL ALUVIAL DEL GLERA

- A- Plano de posición de los SRM sobre la cartografía geológica
- B- Situación de detalle de cada SRM sobre la ortofoto del GIS-Oleícola (MAPA)
- C- Columnas litológicas de los sondeos próximos a los SRM
- D- Gráficos de resultados de campo de los SRM: curvas de decaimiento $E(t)$, curvas de amplitud $E_0(q)$, $T_2^*(q)$, frecuencia $f(q)$, fase $\phi(q)$ y amplitud de ruido en función del momento, y distribución de agua en función de la profundidad.
- E- Ficheros de valores medidos y de resultados de la inversión
- F- Tablas de cálculo del coeficiente de calibración de la transmisividad

VI ZONA DEL CAMPO DE CARIÑENA (JALON)

- A- Plano de posición de los SRM sobre la cartografía geológica
- B- Situación de detalle de cada SRM sobre la ortofoto del GIS-Oleícola (MAPA)
- C- Columnas litológicas de los sondeos próximos a los SRM
- D- Gráficos de resultados de campo de los SRM: curvas de decaimiento $E(t)$, curvas de amplitud $E_0(q)$, $T_2^*(q)$, frecuencia $f(q)$, fase $\phi(q)$ y amplitud de ruido en función del momento, y distribución de agua en función de la profundidad.
- E- Ficheros de valores medidos y de resultados de la inversión
- F- Tablas de cálculo del coeficiente de calibración de la transmisividad

VII ZONA DEL ALUVIAL DEL EBRO (CABAÑAS)

- A- Plano de posición de los SRM sobre la cartografía geológica
- B- Situación de detalle de cada SRM sobre la ortofoto del GIS-Oleícola (MAPA)
- C- Columnas litológicas de los sondeos próximos a los SRM
- D- Gráficos de resultados de campo de los SRM: curvas de decaimiento $E(t)$, curvas de amplitud $E_0(q)$, $T_2^*(q)$, frecuencia $f(q)$, fase $\phi(q)$ y amplitud de ruido en función del momento, y distribución de agua en función de la profundidad.
- E- Ficheros de valores medidos y de resultados de la inversión
- F- Tablas de cálculo del coeficiente de calibración de la transmisividad

VIII DISTRIBUCIÓN DE FICHEROS INFORMÁTICOS GENERADOS. FORMATOS.

GLOSARIO DE SÍMBOLOS UTILIZADOS

- **B** : intensidad del campo magnético terrestre, medido en nT (nanoTeslas)
- **Cp** : coeficiente de calibración que permite calcular *Tsrm* cuando es conocido *Teb*.
- **Cpi** : coeficiente **Cp** referido a un conjunto **i** de sondeos
- **E** : amplitud de la fuerza electromotriz generada en la antena por el campo magnético producido por la precesión de los protones del agua. Se mide en nV (nanoVoltios)
- **E(t)**: variación de **E** en función del tiempo; son los valores registrados en un SRM
- **E₀** : valor máximo inicial del **E**, medido en nV (nano Voltios)
- **E₀(q) T₂^{*}(q) T₁(q)** : valores de **E₀**, **T₁** y **T₂^{*}** en función del momento emitido **q**
- **f** : frecuencia de Larmor, de precesión de los protones, se mide en Hz (Hercios)
- **Fi** : suma de valores del producto **wT₂^{*}z** (aquí, **z** es la potencia de cada capa)
- **k** : permeabilidad calculada a través de SRM, expresada en m/s
- **k(z)** : variación de **k** con la profundidad **z**
- **q** : intensidad del momento magnético emitido, medido en A.ms (Amperios. milisegundo)
- **T₂^{*}** : constante de tiempo de decaimiento de los valores **E(t)**, se mide en ms (milisegundos)
- **T₁** : constante de tiempo de decaimiento de los valores **E(t)**, cuando se emiten dos pulsos de la misma amplitud **q** separados un intervalo de tiempo; se mide en ms (milisegundos). Su valor es del orden de magnitud de 1.5 **T₂^{*}**, y está mejor relacionado con la permeabilidad.
- **T₂^{*}(z) T₁(z)** : valores de las correspondientes constantes de tiempo en función de la profundidad, resultado de la inversión de las curvas **T₂^{*}(q) T₁(q)**
- **T** : para referirse de forma genérica a la constante de tiempo (tanto **T₂^{*}** como **T₁**)
- **Tsrm** : transmisividad deducida de la medición del SRM, expresada en m²/s
- **Teb**: transmisividad calculada por ensayos de bombeo.
- **w(z)** : porosidad expresada en %, en función de la profundidad **z** en metros, resultado de la inversión de la curva **E₀(q)**.

0. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Sumario

Mediante Convenio suscrito entre el IGME y la CHE se ha llevado a cabo un estudio sobre la aplicabilidad de los Sondeos de Resonancia Magnética a la determinación de parámetros hidrodinámicos en acuíferos detríticos. Se han medido 32 SRM en los valles de los ríos Jiloca, Oja, Gállego, Jalón y Ebro, utilizando el equipo NUMIS Plus. La calidad de los registros de campo ha sido buena o regular en el 65% de los casos, a pesar de la poca amplitud de la señal recibida (ausencia o escasez de agua en el momento de la medición) y del elevado ruido electromagnético existente. Salvo en la zona del Jiloca, donde existe una gran heterogeneidad, la concordancia entre los datos conocidos sobre la geometría de los acuíferos y la información obtenida con los SRM es buena, permitiendo estos cuantificar la cantidad total de agua contenida. El resultado de la calibración de los datos para determinación de permeabilidades es consistente cuando la litología de la zona es uniforme, por lo que en esos casos se podrían utilizar las mediciones de SRM para el cálculo de la transmisividad en lugares donde no se disponga de ensayos de bombeo. Se ha encontrado cierta correlación entre el caudal y el máximo valor de la señal medida en el SRM. La determinación de niveles piezométricos mediante SRM es posible para profundidades someras.

0.1 INTRODUCCIÓN

El IGME viene realizando desde 1998 diversos trabajos sobre la puesta a punto y aplicación de un nuevo método de prospección geofísica denominado Sondeos de Resonancia Magnética (SRM). En el año 2002 se estableció un Convenio de Colaboración entre el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), con el fin de llevar a cabo el Proyecto INVESTIGACIÓN DE PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS Y GEOMÉTRICOS EN ACUÍFEROS ALUVIALES DE LA CUENCA DEL EBRO MEDIANTE SONDEOS DE RESONANCIA MAGNÉTICA. El Informe Final de este trabajo (Plata et al, 2004) puede ser consultado tanto en el IGME como en la CHE, recogándose en este resumen algunos aspectos del mismo.

El interés de este Proyecto reside en que para la gestión de las aguas subterráneas es esencial una correcta cuantificación de los parámetros hidrodinámicos de los acuíferos, cuya evaluación mediante pruebas de bombeo requiere la existencia de pozos y de sondeos de observación de las adecuadas características y ubicación, no siempre disponibles. El método SRM ofrece una posible alternativa, de menor coste y mayor versatilidad, para la determinación de la porosidad, permeabilidad y potencia de los acuíferos. Esta alternativa está todavía en fase de desarrollo metodológico, por lo que va a ser evaluada en distintos tipos de acuíferos detríticos de la cuenca del Ebro.

Para la realización de las mediciones de campo se ha dispuesto del equipo NUMIS PLUS, de Iris Instruments (Francia), junto con las aplicaciones informáticas necesarias (programa SAMOVAR) para llevar a cabo el proceso de inversión. Este equipo fue facilitado por la CHE, como parte de su aportación al Convenio. Los trabajos de campo fueron realizados por el IGME, con participación de la CHE, y se llevaron a cabo en septiembre y octubre de 2002,

mediándose un total de 32 Sondeos de Resonancia Magnética en 17 días, en las zonas de los ríos Jiloca (12 SRM), Gállego (1 SRM), Oja (10 SRM), Jalón (7 SRM) y Ebro (2 SRM) (Figura 01, ver también Figura 4b de la Memoria). La recopilación de los trabajos geofísicos de Sondeos Eléctricos Verticales existentes sobre estas zonas, ha permitido la elaboración de modelos geoelectrónicos con los que calcular las matrices numéricas necesarias para la inversión de los datos. Por otra parte, se ha dispuesto de la información de las columnas litológicas, niveles de las capas acuíferas, valores de transmisividad, caudales y nivel piezométrico, para la mayor parte de los pozos existentes más próximos a los lugares de medición de los SRM.

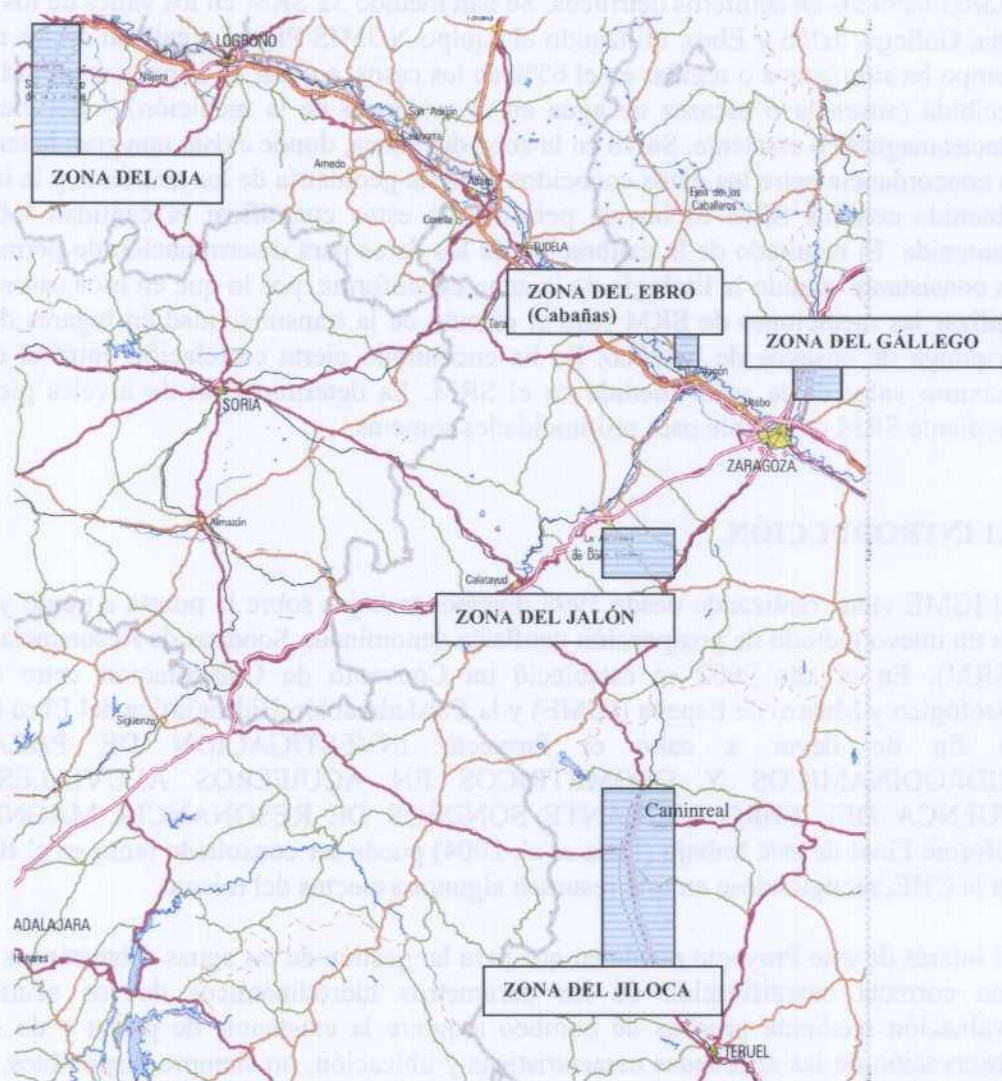


Figura 01. Mapa general de posición de las campañas 2002 de SRM en la Cuenca Hidrográfica del río Ebro.

En la Memoria del Informe Final de este Proyecto, para cada zona (capítulos 8 a 12) se describe sus principales rasgos hidrogeológicos, la toma de datos en campo, la elaboración de la matriz de inversión, el proceso e interpretación de los datos, los cálculos del coeficiente de calibración y determinación de las distribuciones de permeabilidad y transmisividad, el análisis de las relaciones de parámetros de SRM con el caudal (Jiloca y Oja) y nivel piezométrico (Jiloca, Oja y Jalón), y el estudio de otras relaciones como evaluadores de calidad. En Anexo se proporcionan la cartografía geológica, las fotografías de posición de

detalle de cada SRM, las columnas litológicas de cada sondeo utilizado, la totalidad de los gráficos con los datos registrados en campo y el resultado del proceso de inversión, así como las tablas con los valores numéricos, y las tablas de cálculo del coeficiente de calibración. Los ficheros de datos con los datos de campo, proceso, gráficos, cálculos y texto de este Informe están recogidos en formato digital (2550 ficheros), y descritos en Anexo.

02. BASE TEÓRICA DEL METODO SRM

El fundamento de este método estriba en la medición del campo magnético que producen los protones de hidrógeno en su movimiento de precesión, mientras que se reorientan cuando han sido previamente excitados por un campo magnético exterior. En la Naturaleza, y dentro de las primeras decenas de metros del subsuelo, es el agua la que contiene prácticamente todo el hidrógeno presente, por lo que la medición de señal SRM es un indicador de la presencia de agua.

La secuencia de medición consiste en hacer pasar por una bobina, emisora situada en la superficie del suelo, una corriente eléctrica (pulso o momento de excitación q , medido en A.ms) con la frecuencia de precesión del hidrógeno. El campo magnético generado excita los protones de hidrógeno del subsuelo, que vuelven a orientarse a su posición de equilibrio inicial al cortar el pulso de corriente. En ello tardan un determinado tiempo, durante el cual el campo magnético generado por los protones induce en el bucle de cable extendido sobre la superficie una corriente eléctrica de la misma frecuencia de precesión. Lo que se mide (Figura 02) es la amortiguación de dicho campo eléctrico con el tiempo $E(t)$, que es exponencial cuando proviene del agua, y cuya amplitud máxima (inicial) E_0 depende de la cantidad de protones presentes o cantidad de agua. El tiempo T (constante de tiempo de decaimiento) que tarda en amortiguarse, depende del tamaño medio de los poros donde está contenida el agua, de tal forma que es pequeño para las arcillas y grande para las gravas sueltas.

La profundidad de investigación alcanzada depende de la intensidad del momento magnético emitido, por lo que para obtener información de mayor profundidad se emite un nuevo momento con mayor intensidad de corriente, y así sucesivamente. El resultado de la medición de un SRM es, por tanto, una colección de n curvas $E(t)$ de decaimiento, en función del tiempo, de la f.e.m. producida por la excitación de cada momento q emitido. Mediante el cálculo del valor máximo inicial de cada curva, E_0 , y de la constante de decaimiento T se forman las funciones $E_0(q)$ y $T(q)$, que son el resultado final del proceso de medición.

La interpretación de los resultados consiste en convertir estos valores en la distribución, en función de la profundidad, del tanto por ciento de agua de las zonas saturadas (porosidad) $w(z)$, y de $T(z)$ (indicador litológico y de permeabilidad). Los cálculos del proceso de inversión se apoyan en una matriz numérica que tiene en cuenta el modelo geoelectrico del lugar, el tipo de antena utilizado y la inclinación del campo magnético terrestre. El proceso consiste, en síntesis, en calcular la respuesta teórica de un modelo del subsuelo y compararla con los valores realmente medidos, realizando los ajustes necesarios en el modelo hasta encontrar la mejor solución, estimada por un error de ajuste en %. En cualquier caso, el valor integrado del producto de la potencia de cada capa por su contenido en agua, permanecerá inalterable (principio de equivalencia de las soluciones).

Relaciones empíricas, como $k = C_p \cdot w^2 \cdot T^b$, permiten acceder a una evaluación de la permeabilidad k , y de la transmisividad $T_{sm} = z \cdot k$ (z es la potencia saturada) utilizando los

datos medidos. La obtención del coeficiente C_p requiere la calibración con valores de transmisividad determinados por ensayos de bombeo.

En cualquier circunstancia, las dimensiones de la antena suponen un límite para la penetración, que es de un orden de magnitud igual al diámetro del bucle empleado. La información obtenida proviene además de una extensión de terreno de al menos una vez y media dicho diámetro a partir del punto central de aplicación. Este aspecto integrador de valores promediados de un gran volumen del subsuelo es preciso tenerlo en cuenta a la hora de apreciar los resultados obtenidos con un SRM, ya que la permeabilidad de una formación es un parámetro dependiente de la escala considerada.

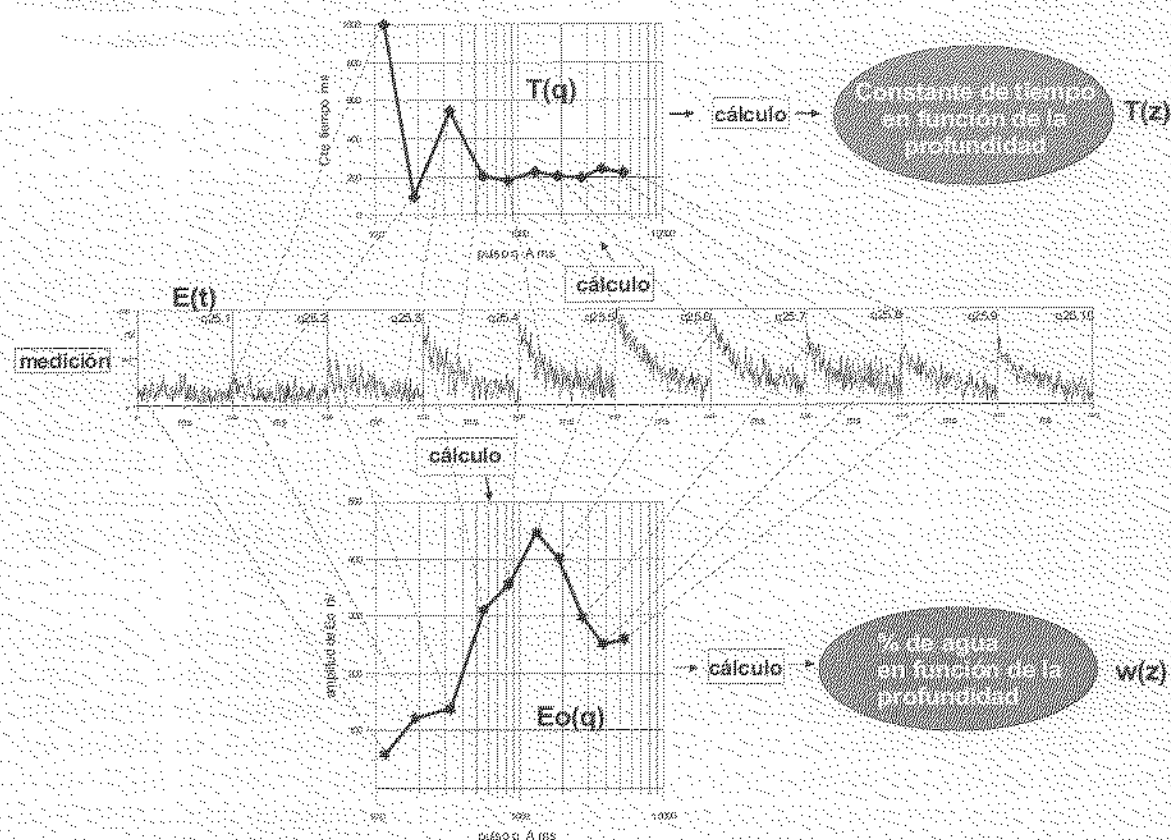


Figura 02: Esquema del registro y elaboración de los datos de un SRM

El bucle o antena extendido sobre la superficie del suelo, además de medir el campo magnético de resonancia, mide también los campos electromagnéticos existentes de otros orígenes, que suponen un ruido externo no deseable. La señal $E(t)$ medida en los SRM es del orden de decenas o unos pocos centenares de nV, mientras que el ruido puede ser de varios miles de nV. A fin de mejorar la relación señal ruido, la técnica empleada consiste en emitir el mismo pulso o momento varias veces, sumando la señal recibida (stacking). Si el ruido es aleatorio, esta suma tenderá a reducir su influencia. Además, una forma eficaz de disminuir el efecto del ruido es diseñar la antena en forma de doble bucle en "ocho", aunque de esta manera, con la misma longitud de cable, la penetración disminuye, ya que el área eficaz de la antena es menor. Si la frecuencia de precesión está próxima a un armónico de 50 Hz, la eliminación del ruido producido por las líneas e instalaciones eléctricas resulta más problemática.

El método de SRM es ,por lo tanto, una técnica geofísica específica para su utilización en investigación hidrogeológica, permitiendo la detección desde la superficie de la presencia de agua libre en los primeros 150 m del subsuelo. La calidad de los datos medidos depende tanto de factores geográficos y geológicos (amplitud e inclinación del campo magnético terrestre, susceptibilidad magnética y conductividad eléctrica de las rocas), como ambientales (ruidos electromagnéticos naturales y artificiales). Sobre las bases teóricas del método de Sondeos de Resonancia Magnética, así como sobre los resultados de diversos ensayos ya realizados, existe en la actualidad una amplia documentación publicada (Legchenko et. al. 1997, Legchenko y Shushakov 1998, Lubczynski y Roy 2004, Plata y Rubio 1999, Plata y Rubio 2002, Roy y Luczynski 2003, Yaramanci et al 1998, entre otros).

03. ASPECTOS GENERALES DE LOS DATOS DE CAMPO Y DE LA INVERSIÓN

Los parámetros para efectuar los registros de campo fueron seleccionados en cada emplazamiento en función de la profundidad del objetivo y del ruido ambiente. Como consecuencia de ellos se han utilizado diversas dimensiones y configuraciones de la antena emisora-receptora: formando un ocho, con dos cuadrados de 75 m de lado cada uno, para el Jiloca y el Gállego, un ocho de 50 m para el Oja y el Ebro, y un bucle cuadrado único de 150 m de lado para el Jalón, aunque con excepciones para cada zona. En todos los casos se ha medido una secuencia de 16 momentos de emisión, con un número de pulsos por momento (stacking) entre 64 y 128. La duración de las mediciones oscila entre 2 y 6 horas (registros de 1 a 5 horas, con un tiempo medio de 2.5 horas).

El nivel de ruido encontrado (Figura 03, ver también Figura 5 de la Memoria) ha sido inferior a 1000 nV en la zona del Oja (con relaciones Señal/Ruido entre 1 y 4 en general), de 200-6000 nV en las del Jiloca (S/R =1-8) y Jalón (S/R= 1-3), y superior a 5000 nV en el Gállego (S/R=1.6), llegando a más de 7.000 nV en Cabañas (S/R=0.7). Sin embargo, para la calidad final de los datos registrados tiene todavía más influencia la amplitud de la señal máxima E_0 proveniente del agua: para el conjunto de las mediciones los resultados de campo han sido buenos o muy buenos para el 45 % de los SRM, y malos para el 35 %, fundamentalmente debido a la débil amplitud de la señal.

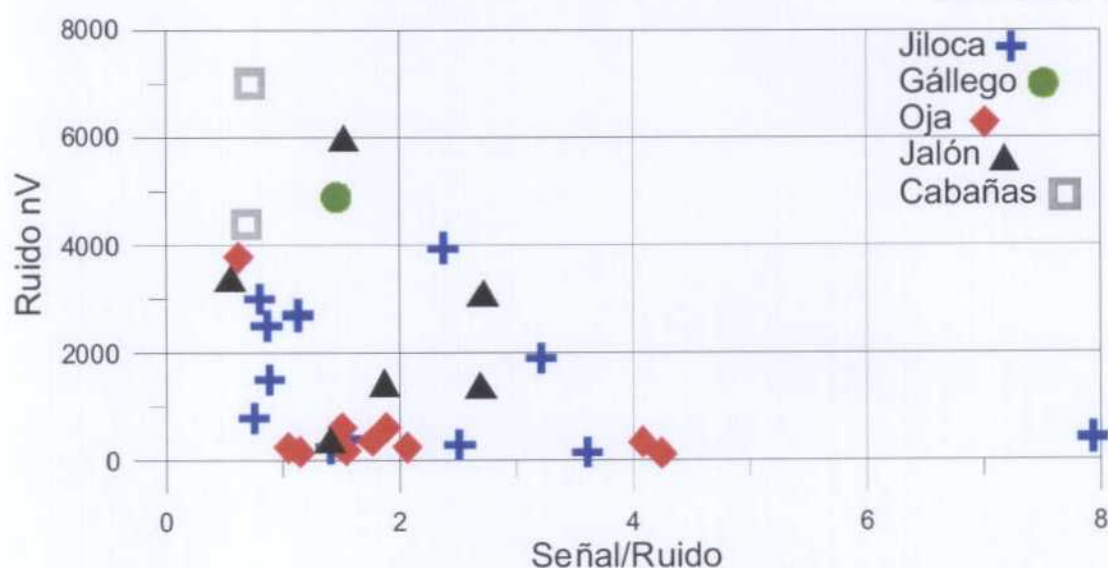


Figura 03. Ruido encontrado y relación Señal/Ruido obtenida en los diversos SRM efectuados

El proceso de datos, interpretación y elaboración del Informe de resultados, llevado a cabo por el IGME, consta de las siguientes etapas:

- Análisis de los datos de campo y definición de los parámetros del proceso de inversión.
- Inversión de los datos: obtención de $w(z)$ y $T(z)$.
- Análisis de los resultados junto con la información hidrogeológica conocida; elaboración de conclusiones.
- Cálculo del coeficiente C_p de calibración utilizando ensayos de bombeo ($T_{srm} = z C_p w^a T^b = z k = T_{eb}$).
- Cálculo de la distribución $k(z)$ y $T_{srm}(z)$, utilizando el coeficiente C_p .
- Análisis de la relación entre el nivel piezométrico medido y el determinado por interpretación del SRM.
- Análisis de la relación entre el caudal conocido y varios parámetros del SRM, y otras relaciones.

El análisis individual de cada SRM medido en campo ha consistido en el estudio de los registros $E(t)$, de la relación Señal/Ruido, del comportamiento de la fase y de la frecuencia, de la amplitud de la función $E_0(q)$, del espectro de la señal, etc, para efectuar una depuración de los datos, y definir los parámetros de los cálculos de inversión y evaluar los resultados. En ocho casos se ha considerado necesario eliminar algún punto medido de la secuencia de registro, y en 9 sondeos se ha aplicado un filtro especial (Notch Filter) de amortiguación de armónicos de inducción de líneas eléctricas. La inversión de datos por SAMOVAR, permite obtener las distribuciones de agua en % y de la Constante de tiempo en función de la profundidad ($w(z)$ y $T(z)$), así como elaborar los gráficos correspondientes. En la Figura 04 se da un ejemplo de la expresión gráfica de los datos provenientes del registro en campo y del resultado de su inversión. El parámetro de regularización, cuya función es suavizar la solución $w(z)$, ha sido adoptado por defecto, siendo en general inferior a 1000 (excepto en tres SRM del Jiloca y en 2 del Jalón), por lo que se ofrecen interpretaciones con una concentración de agua en pocas capas. Para el 29% de los SRM se ha conseguido un ajuste entre medidas y modelo con desviación inferior al 5%, siendo entre el 5 y el 10% para el 47% de las mediciones. Desviaciones superiores se dan en 6 SRM del Jiloca y en uno de cada una de las demás zonas.

NUMIS - Surface Magnetic Resonance System

Site: te26

Loop: 4 - 75.0 Date: 26.09.2002 Time: 13:08

NUMIS data set: C:\docu\srmebro2002\jiloca\te26\TE26.inp

matrix: C:\docu\srmebro2002\jiloca\matriz\75JILOCA.MRM

loop: eight square, side = 75.0 m

geomagnetic field:

inclination= 55 degr. magnitude= 44737.09 nT

time constant = 25.00 ms

average S/N = 7.93

fitting error = 1.328 %

parameter of regularization = 122.1

permeability constant Cpx = 5.16e-06

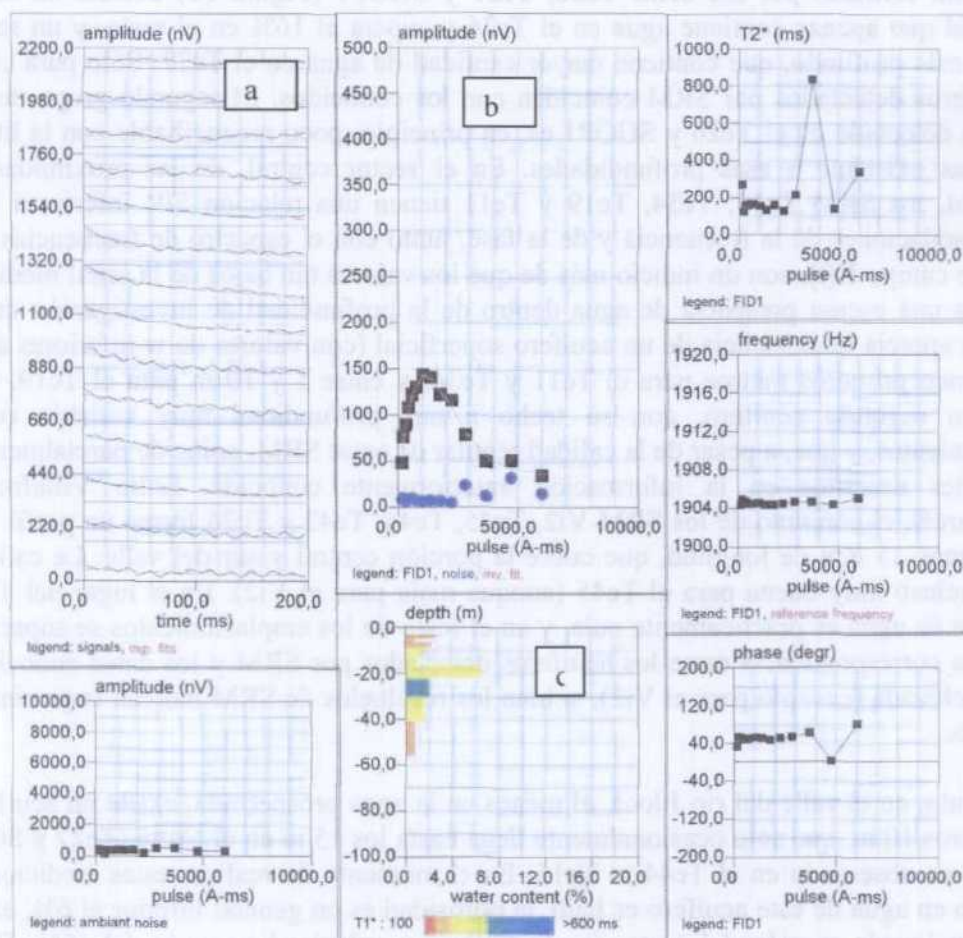


Figura 04. Resultado de la medición de campo y de la inversión del SRM Te26 de la zona del Jiloca. a) curvas de campo $E(t)$ para cada momento q de emisión. b) curva resultado $E_0(q)$. c) curva $w(z)$ resultado de la inversión; el color indica el valor del parámetro T . El resto de las curvas expresan la variación del ruido, Tiempo de decaimiento, fase y frecuencia en función del momento de emisión.

04. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS CON LA INFORMACIÓN HIDROGEOLÓGICA CONOCIDA

En la *zona del alto Jiloca* se midieron 12 SRM, todos ellos sobre el cuaternario, aunque los acuíferos en algunas ocasiones se sitúan también en materiales calizos más profundos. El tipo de antena empleado ha sido, en general, de un doble bucle en ocho, de 75 m de lado. La amplitud de la señal es inferior a los 200 nV, con alguna excepción. El nivel de ruido ambiental llega a ser alto en bastantes emplazamientos, obteniéndose una relación Señal/Ruido entre 0.7 y 3.6, aunque en el SRM Te26 se llega a 8.

En toda la zona se presenta una gran alternancia de materiales permeables (gravas, arenas, tobas, conglomerados) e impermeables (arcillas y margas), sin que sea posible efectuar una correlación ni litológica ni de capas acuíferas entre sondeos, aunque se encuentren a distancias entre ellos inferiores a un kilómetro. En el norte del valle, área sur de Calamocha, el conjunto formado por los SRM Te26, Te27 y SGOP1 (Figura 05) detecta un acuífero superficial que apenas contiene agua en el Te26 y supera el 16% en el resto, y un segundo acuífero más profundo, que contiene mayor cantidad de agua en el Te27. Sólo para el Te27 los acuíferos detectados por SRM coinciden con los conocidos. El segundo grupo de capas con agua detectado en el Te26 y SGOP1 es, en principio, poco reconciliable con la litología de arcillas existente a esas profundidades. En el sector central, en las proximidades de Caminreal, los SRM Te15, Te34, Te19 y Te11 tienen una relación S/R inferior a 1. Las fuertes oscilaciones de la frecuencia y de la fase, junto con el espectro de frecuencias de las curvas de campo $E(t)$, son un indicio más de que los valores tan bajos de la señal medida son debidos a una escasa presencia de agua dentro de la profundidad de investigación de estos SRM. Se aprecia la existencia de un acuífero superficial (con valores de w inferiores al 4%), en los cinco primeros metros para el Te11 y Te34, y entre 5 y 10 m para el Te19. Podría existir un segundo acuífero, con su techo a una profundidad muy variable con los emplazamientos, y que, a pesar de la calidad regular de estos SRM, coincide parcialmente con los niveles descritos en la información anteriormente conocida. Entre Villafranca y Torrelacarcél, el conjunto de los SRM Vi2, Te45, Te44, Te42 y Te36 forma un perfil Norte-Sur, de unos 15 Km de longitud, que cubre la porción central y sur del valle. La calidad es buena, incluso muy buena para el Te45 (aunque mala para el Vi2). En el lugar del Te42 la existencia de agua es prácticamente nula, y en el resto de los emplazamientos se supera poco el 4%. La correspondencia entre los acuíferos detectados por SRM y los datos conocidos es bastante elevada (excepto para el Vi2), si bien los resultados de SRM indican la presencia de más capas.

En conjunto, en el valle del río Jiloca, al menos en la zona prospectada, existe un acuífero en los primeros 10 m, que sólo ocasionalmente llega hasta los 15 m en el Norte (Te27 y SGOP1) y que no es observado en el Te44 ni Te15. En el momento de realizar estas mediciones, el contenido en agua de este acuífero es bajo, la porosidad es en general inferior al 6%, excepto en la mencionada sección del norte, donde se llegó a calcular hasta más del 16%. Es muy probable la existencia de un segundo acuífero, normalmente por debajo de los 25 m de profundidad, con unos contenidos en agua del mismo orden de magnitud que el acuífero superior (excepto en el norte, donde de nuevo se alcanzan valores superiores al 15%), y formado por materiales de permeabilidad muy variable. Ambos acuíferos presentan las suficientes variaciones con los emplazamientos, como para poner de manifiesto que no se trata de un único nivel litológico, aunque pueda serlo la capa freática, en ocasiones interrumpida por la existencia de intercalaciones de acuitados. En algunos casos, como en el

emplazamiento Te11, el resultado obtenido con los SRM sugiere efectuar una revisión de las columnas hidrogeológicas previas.

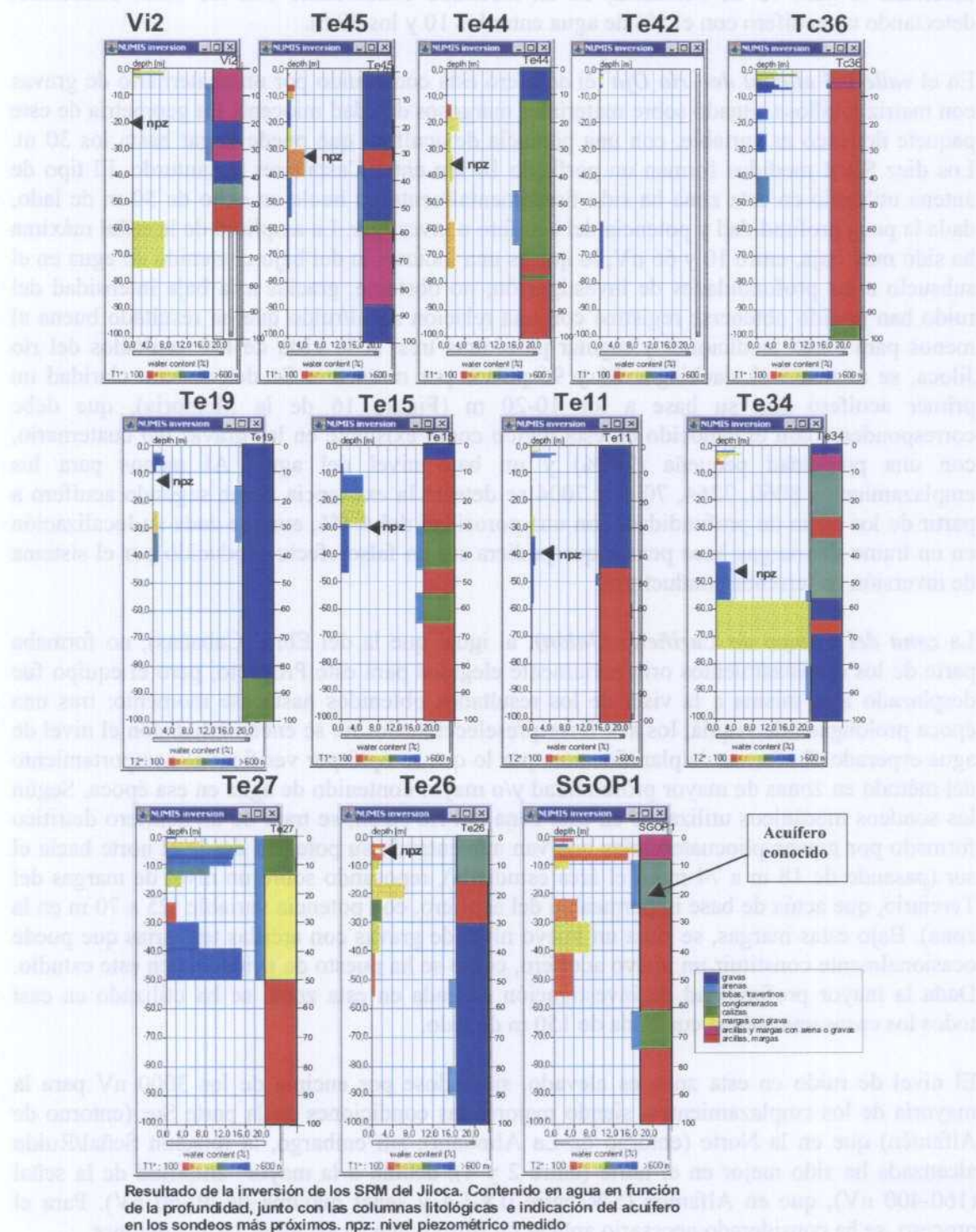


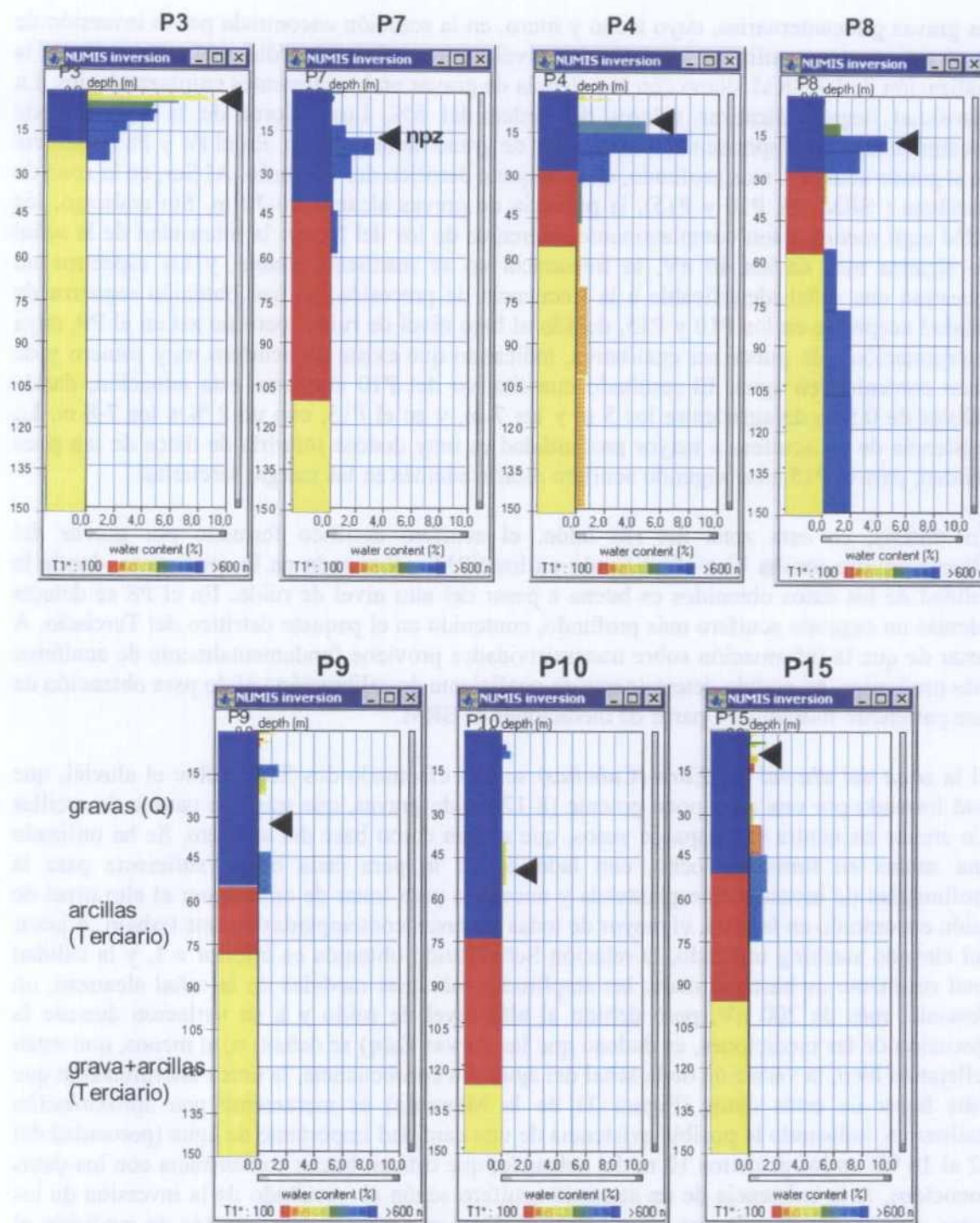
Figura 05. Comparación entre los resultados de la distribución de agua encontrada con los SRM y los datos hidrogeológicos conocidos, en la zona del aluvial del Jiloca. Los colores asignados a la leyenda de la litología se corresponden con los valores equivalentes de la constante de decaimiento T

En la **zona del aluvial del Gállego**, en las proximidades de Villanueva, se efectuó un SRM, que tuvo que ser interrumpido a causa del elevado ruido electromagnético; no obstante, su inversión (Figura 13 de Memoria) da un resultado concordante con los datos conocidos, detectando un acuífero con el 5% de agua entre los 10 y los 40 m.

En el **valle del aluvial del río Oja** el acuífero está constituido por un cuaternario de gravas con matriz arcillosa situado sobre materiales margosos de edad miocena. La geometría de este paquete detrítico es variable, con una potencia de acuífero que puede llegar hasta los 30 m. Los diez SRM medidos forman un perfil de 16 km entre Castañares y Santurde. El tipo de antena utilizado en esta zona ha sido fundamentalmente un bucle en ocho de 50 m de lado, dada la poca profundidad y potencia del acuífero a investigar. La amplitud de la señal máxima ha sido muy baja, entre 10 y 66 nV, lo que es una indicación del bajo contenido en agua en el subsuelo a las profundidades de investigación; no obstante, gracias a la baja intensidad del ruido han podido obtenerse registros con una relación señal/ruido que ha resultado buena al menos para cinco mediciones y regular para otras tres. A la vista de los resultados del río Jiloca, se aumentó el stacking a 64 y 96 pulsos por momento. Se detecta con claridad un primer acuífero con su base a los 10-20 m (Figura 16 de la Memoria), que debe corresponderse con el conocido en esta región como existente en las gravas del cuaternario, con una porosidad pequeña (2-4%) y un bajo nivel del agua. Al menos para los emplazamientos 8060, 3264, 7007 y 7004 se detecta la existencia de un segundo acuífero a partir de los 30 m de profundidad, con una porosidad del 4-6%, aunque dada su localización en un tramo de margas hace pensar que pudiera ser un falso efecto producido por el sistema de inversión en terrenos conductores.

La **zona del Campo de Cariñena (Jalón)**, al igual que la del Ebro (Cabañas), no formaba parte de los emplazamientos originariamente elegidos para este Proyecto, pero el equipo fue desplazado a la misma a la vista de los resultados obtenidos hasta ese momento: tras una época prolongada de sequía, los acuíferos preseleccionados no se encontraban con el nivel de agua esperado al efectuar la planificación, por lo que se optó por verificar el comportamiento del método en zonas de mayor profundidad y/o mayor contenido de agua en esa época. Según los sondeos mecánicos utilizados en esta zona del río Jalón, se trata de un acuífero detrítico formado por gravas pliocuaternarias que van aumentando su potencia desde el norte hacia el sur (pasando de 18 m a 74 m en el área estudiada), reposando sobre un nivel de margas del Terciario, que actúa de base impermeable del acuífero, con potencia variable (25 a 70 m en la zona). Bajo estas margas, se sitúa un nuevo nivel de gravas con arcillas terciarias que puede ocasionalmente constituir un nuevo acuífero, como se ha puesto de evidencia en este estudio. Dada la mayor profundidad de investigación deseada en esta zona, se ha utilizado en casi todos los casos una antena cuadrada de 150 m de lado.

El nivel de ruido en esta zona es elevado, situándose por encima de los 3000 nV para la mayoría de los emplazamientos, siendo mejores las condiciones en la parte Sur (entorno de Alfamén) que en la Norte (entorno de La Almunia); sin embargo, la relación Señal/Ruido alcanzada ha sido mejor en el norte (entre 2 y 4), debido a la mayor amplitud de la señal (160-400 nV), que en Alfamén (S/R entre 0.8-1.4 y señal máxima de 40-60 nV). Para el proceso, se ha considerado necesario aplicar un filtro notch a casi todas las mediciones.



Resultados de los SRM en la zona del río Jalón Perfil Norte (Almunia) P3-P8 Perfil Sur (Cariñena) P9-P15

Figura 06. Comparación entre los resultados de la distribución de agua encontrada con los SRM y los datos hidrogeológicos conocidos, en la zona del aluvial del Jalón. Se indica el nivel piezométrico npz.

De los 7 SRM efectuados, sólo el P3 y el P7 pueden considerarse de muy buena calidad, con señal máxima por encima de los 200 nV. El resultado de los SRM efectuados en las proximidades de La Almunia (P3, P4, P7 y P8) está representado de forma ordenada según un perfil Oeste-Este en la Figura 06; en todos los SRM se refleja la presencia de un acuífero en

las gravas pliocuaternarias, cuyo techo y muro, en la solución encontrada por la inversión de los datos, es muy conforme tanto con los niveles piezométricos medidos el mismo día de la realización de los SRM, como con la potencia de gravas en los diferentes emplazamientos. La porosidad llega a alcanzar valores del orden del 8%. Los valores de la constante de decaimiento se corresponden con materiales de grano medio-grueso. En el P4 y P8 se detecta un segundo acuífero, más profundo, en el paquete detrítico del Terciario. Al Sur, en la zona de Cariñena (SRM P9, P10 y P15), la potencia de gravas alcanza 50-70 m. Sin embargo, los SRM aquí medidos son completamente diferentes de los del Norte: la intensidad de la señal no alcanza más de los 40 nV, la frecuencia no se mantiene estable, y los espectros no muestran una señal identificable a la frecuencia de precesión; se han obtenido registros de calidad aceptable en los P10 y P15, debido al bajo nivel de ruido, pero no así en el P9, cuya interpretación sólo puede ser cualitativa, indicando que existe un acuífero muy somero y de poco contenido en agua. El resultado cuantitativo del P10 confirma esta situación, dando valores de 0.5 % de agua entre los 5 m y los 7 m, y en el P15, con un 2 % a los 7-8 m. La existencia de un acuífero a mayor profundidad es muy dudosa inferirla de datos de tan poca calidad; para el P15, este segundo acuífero estaría además en las margas terciarias.

En síntesis, en esta zona del río Jalón, el acuífero detrítico formado por gravas del Pliocuaternario resulta bien identificado en los SRM, sobre todo en la zona norte, donde la calidad de los datos obtenidos es buena a pesar del alto nivel de ruido. En el P8 se detecta además un segundo acuífero más profundo, contenido en el paquete detrítico del Terciario. A pesar de que la información sobre transmisividades proviene fundamentalmente de acuíferos más profundos, ha podido determinarse un coeficiente de calibración válido para obtención de este parámetro hidráulico a partir de mediciones de SRM.

El la **zona del aluvial del Ebro (Cabañas)** se han efectuado dos SRM sobre el aluvial, que está formado por una capa poco potente (8-12 m) de gravas, que tras una pasada de arcillas y/o arenas encuentra una capa de yesos, que actúan como base del acuífero. Se ha utilizado una antena en forma de ocho, con lado de 50 m para cada bucle, suficiente para la profundidad de investigación planteada y necesaria para tratar de amortiguar el alto nivel de ruido encontrado en la zona, el mayor de todas las áreas contempladas en este trabajo. A pesar del elevado stacking utilizado, la relación Señal/Ruido obtenida es inferior a 1, y la calidad total resultante es bastante mala; las amplitudes máximas medidas de la señal alcanzan, no obstante, más de 200 nV, pero debido al alto nivel de ruido y a su variación durante la ejecución de las mediciones, es dudoso que las curvas $E_0(q)$ se deban, o, al menos, que estén reflejando bien, la variación de la señal del agua. En consecuencia, la única interpretación que cabe hacer de estos datos (Figura 31 de la Memoria) es meramente una aproximación cualitativa, indicando la posible existencia de una cantidad importante de agua (porosidad del 12 al 16 %) en los primeros 10 m del subsuelo, que está en buena consonancia con los datos conocidos. A la existencia de un segundo acuífero según el resultado de la inversión de los datos, sólo puede dársele una escasa fiabilidad, ya que para esos momentos de medición el ruido es muy superior a la señal. No obstante, es notable que los valores que alcanza el parámetro T_1 pertenecen al tipo de materiales atravesados, en toda la profundidad de los SRM.

05. COEFICIENTE DE CALIBRACIÓN DE LA TRANSMISIVIDAD

A partir de los valores de transmisividad T_{eb} calculados en ensayos de bombeo puede obtenerse un coeficiente de calibración C_p mediante la relación

$$C_p = T_{eb} / (z w^a T^b)$$

donde z es la potencia del acuífero, w es la porosidad, T es la constante de tiempo, y a y b son constantes empíricas. Esto permite utilizar los valores medidos en los SRM para estimar la transmisividad mediante

$$T_{srm} = C_p z w^a T^b$$

en lugares donde no se disponga de ensayos de bombeo. Con dicho coeficiente puede calcularse la distribución de los valores de permeabilidad $k(z)$ y de transmisividad $T(z)$ en función de la profundidad.

Para la zona del Jiloca se ha encontrado que no es posible utilizar un único coeficiente para el conjunto de las mediciones efectuadas: como valor más representativo para los acuíferos en materiales detríticos cuaternarios de grano medio se ha optado por $Cp2=5.94E-08$, y para materiales de grano fino y más arcillosos el valor calculado es de $Cp1=2.54E-06$. No obstante, dada la gran heterogeneidad de las situaciones hidrogeológicas encontradas en este valle, así como que los valores de T_{eb} pueden incluir acuíferos más profundos, estos resultados deben ser tomados con todas las reservas. En la Figura 07 (ver también Figura 9 de la Memoria) se representa el resultado final de la calibración, donde se aprecia la variación del coeficiente con los emplazamientos.

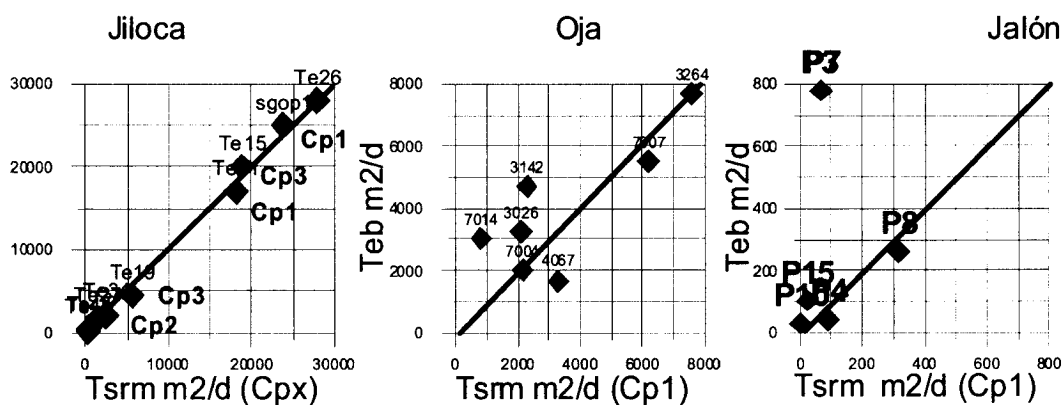


Figura 07. Resultado de la calibración de transmisividad en las zonas del Jiloca, Oja y Jalón. Los valores T_{srm} provienen de las mediciones de SRM y los T_{eb} de los ensayos de bombeo. C_p es el coeficiente de calibración para cada sondeo o conjunto de una zona.

Para la zona de Gállego el coeficiente de calibración calculado es de $Cp=6.86E-09$ (pasaría a $7.13E-08$ considerando el mayor de los valores conocidos de transmisividad por ensayos de bombeo), para un tramo de gravas.

En los SRM efectuados en el río Oja (Figura 07, ver también Figura 17 de la Memoria) el coeficiente de calibración más adecuado es $Cp1=8.26E-07$, siendo en este caso menor la dispersión entre los diferentes emplazamientos, por lo que este valor puede adjudicarse a los

materiales detríticos cuaternarios de gravas en matriz arcillosa, y podría ser empleado para evaluación de permeabilidades en lugares de este valle donde no se disponga de ensayos de bombeo y se lleven a cabo mediciones de SRM.

En la zona del Jalón (Figura 07, ver también Figura 24 de la Memoria), dado que estos SRM son de muy buena calidad, se pone en evidencia que los valores de transmisividad mediante ensayo de bombeo suministrados para los emplazamientos P3 y P7, de $780 \text{ m}^2/\text{día}$, no se corresponden con el orden de magnitud medido en los SRM, por lo que deben provenir de otro tipo de litología o de acuíferos más profundos, no alcanzados por las mediciones de SRM, y por tanto no pueden ser tenidos en cuenta. El valor calculado de $Cp1=2.86E-09$ se ajusta razonablemente bien para los sondeos P9, P10, P4 y P8. Con este coeficiente de calibración, el valor determinado para los emplazamientos P7 y P3 sería de $55 \text{ m}^2/\text{día}$.

En el conjunto de los SRM medidos y calibrados en este trabajo, el coeficiente de calibración toma ordenes de magnitud de $2.5E-06$ para materiales de grano fino, pasando a $8E-08$ para gravas con matriz arcillosa, y a $6-7 E-08$ o $3-7E-09$ para gravas más limpias.

Una vez determinado el coeficiente de calibración, los valores registrados han sido nuevamente procesados para calcular la distribución de permeabilidad y de transmisividad acumulada en función de la profundidad. En la Figura 08 se da un ejemplo de su expresión gráfica (Figuras 10, 13, 18, 25 y 31 de la Memoria).

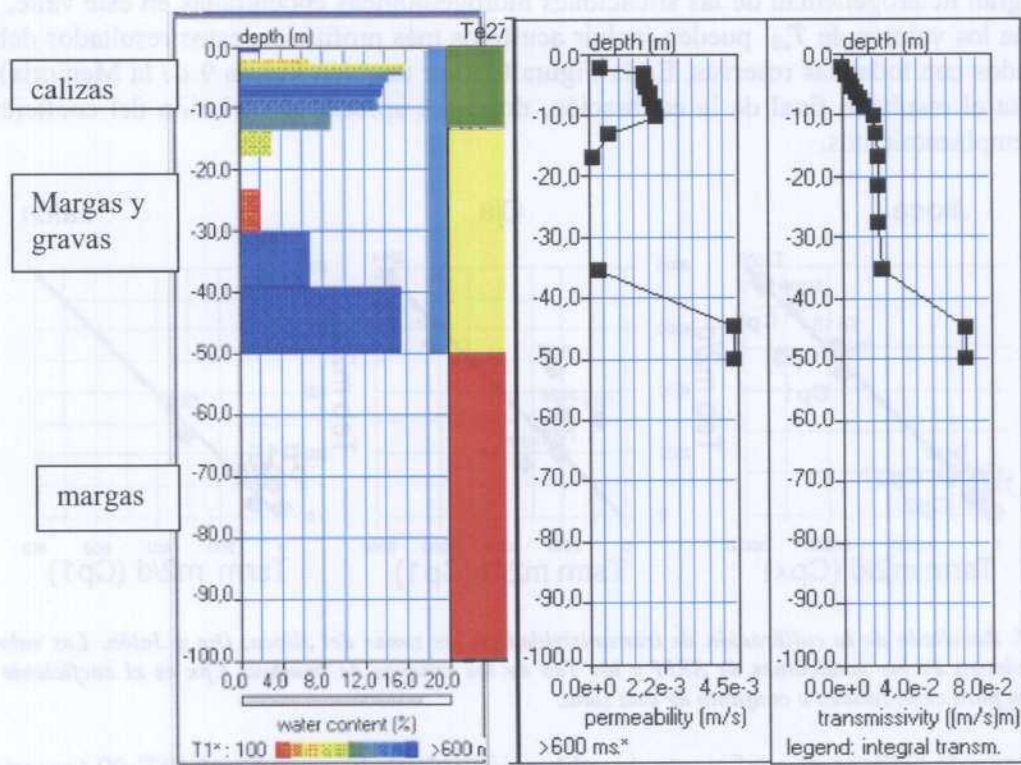


Figura 08. Resultado del cálculo de distribución de permeabilidad y transmisividad acumulada para el SRM Te27 de la zona del Jiloca.

06. ESTIMACIÓN DEL CAUDAL Y DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO POR SRM

Se ha efectuado un análisis de la relación existente entre el caudal medido y varios parámetros de los SRM, buscando la posibilidad de utilizar estos últimos para estimación de caudales: caudal- T_{srn} total; caudal- T_{srnmax} ; caudal- E_{0max} ; caudal- T_{max} .

En el Jiloca (Figura 11 de la Memoria) se aprecia una cierta correlación entre los valores de transmisividad global calculados por SRM (T_{srn} total) y los caudales determinados en los pozos, mientras que la correlación es mala utilizando los valores de máxima transmisividad (T_{srnmax}), valor máximo medido de señal E_{0max} y del valor máximo de la constante de tiempo T_{max} .

En el Oja, la correlación del caudal con la transmisividad total para el tramo acuífero según los SRM es buena para el grupo de sondeos utilizados en el cálculo final del coeficiente de calibración, quedando más desagrupados los SRM 7014, 3062 y 3142. La relación con la transmisividad máxima calculada presenta mejor correlación que la obtenida en el río Jiloca, al igual que la correlación con los valores máximos E_{0max} de señal medida (Figura 09, ver también Figura 19 de la Memoria). De nuevo no se aprecia relación con los valores de T_{max} . Quizá podría utilizarse el parámetro E_{0max} o el valor de T_{srn} total medidos en el SRM como estimador del caudal, siempre que la litología se mantenga uniforme.

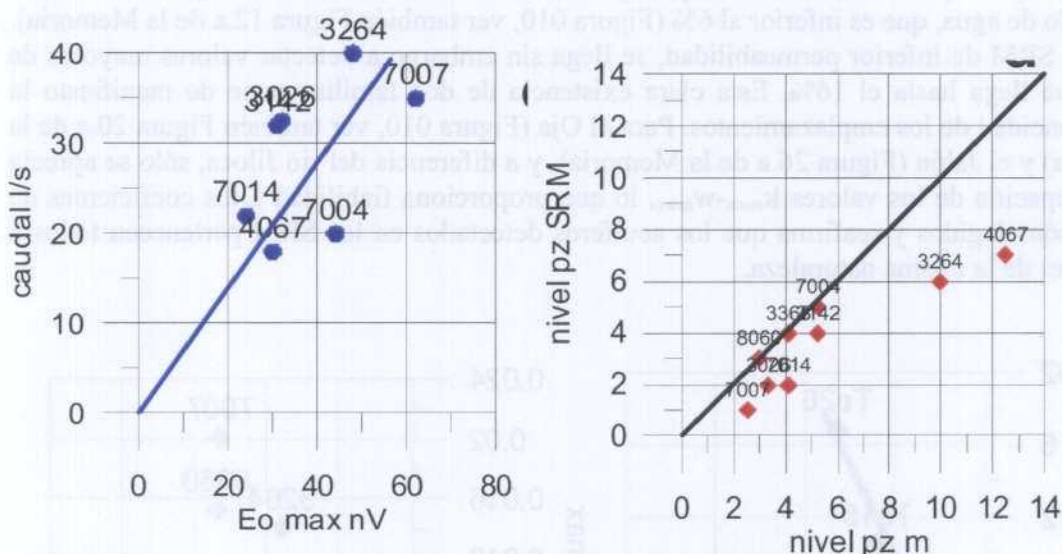


Figura 09. Izquierda: correlación entre los valores medidos E_0 (amplitud máxima de la señal) y los caudales en l/s para la zona del río Oja. Derecha: relación entre el nivel piezométrico medido en los pozos y el determinado por SRM para la zona del río Oja.

Respecto del nivel piezométrico, en el Jiloca se ha intentado correlacionar las mediciones efectuadas en los pozos con las estimadas a través de la interpretación de los SRM. Es preciso tener en cuenta dos aspectos: por una parte, no podemos asegurar que los valores piezométricos medidos se refieran todos a la misma fecha de realización de las mediciones de los SRM; por otra parte, la precisión del inicio de una capa acuífera en un SRM no puede ser mejor de 5 m (Figura 2 de la Memoria) a partir de una profundidad superior a 20-25 m. Otras desviaciones pueden ser debidas a la diferencia que puede establecerse entre el nivel medido y la profundidad del acuífero, según el tipo de confinamiento existente. Con estas salvedades, el

resultado obtenido en el Jiloca (Figura 12.d de la Memoria) muestra que, aunque ciertamente existe una correlación, en este caso hay en general desviaciones grandes para profundidades superiores a los 10 m. En la zona del Oja se dispone de suficientes valores de nivel piezométrico medidos de forma simultánea a la realización de los SRM como para intentar ver su correlación con los niveles calculables a partir de la inversión de los SRM. Se presenta en la Figura 09 (ver también Figura 20.d de la Memoria), de donde se deduce que los valores determinados por SRM pueden aceptarse como una aproximación, con errores inferiores en general a 1 m para acuíferos someros. De nuevo se producen desviaciones importantes en algunos lugares (3264 y 4067), cuya razón desconocemos. En el Jalón la correlación es buena hasta los 15 m de profundidad; para los lugares P15, P9 y P10 la calidad de los datos no permite dar fiabilidad a la inversión(Figura 26.d de la Memoria).

07. UTILIZACIÓN DE OTROS PARÁMETROS DE SRM

Se han analizado además algunas relaciones entre parámetros medidos y/o calculados, para deducir la posibilidad de su utilización como criterios de control de calidad de las mediciones y/o de la inversión: $k_{max}-w_{max}$, $E_{0max}-w_{max}$ y $E_{0max}-T_{eb}$.

Del análisis efectuado de la relación entre los valores máximo de porosidad y de permeabilidad calculados ($k_{max}-w_{max}$), se observa que en el Jiloca, para los emplazamientos Te15 y Te26 la permeabilidad es mayor que en el resto, no dando esto lugar a un mayor contenido de agua, que es inferior al 6% (Figura 010, ver también Figura 12.a de la Memoria). Para los SRM de inferior permeabilidad, se llega sin embargo a detectar valores mayores de agua, que llega hasta el 16%. Esta clara existencia de dos familias pone de manifiesto la heterogeneidad de los emplazamientos. Para el Oja (Figura 010, ver también Figura 20.a de la Memoria) y el Jalón (Figura 26.a de la Memoria), y a diferencia del río Jiloca, sólo se aprecia una agrupación de los valores $k_{max}-w_{max}$, lo que proporciona fiabilidad a los coeficientes de calibración elegidos y reafirma que los acuíferos detectados en los SRM pertenecen todos a materiales de la misma naturaleza.

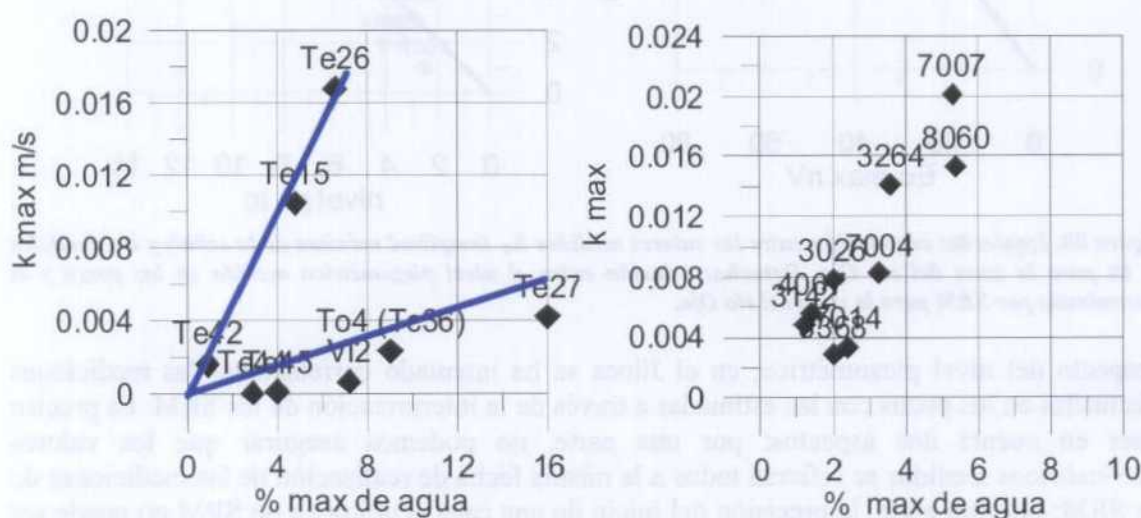


Figura 010. Relación entre la máxima cantidad de agua y la permeabilidad calculada en los SRM de la zona del Jiloca (izquierda) y Oja (derecha).

La relación entre la máxima amplitud de señal medida E_0 con la porosidad calculada ($E_{0max}-w_{max}$) puede considerarse una medición de calidad del SRM o de su proceso de inversión. Por ejemplo, en el Jiloca (Figura 011, ver también Figura 12.b de la Memoria), se destaca el SRM SGOP1, donde es evidente que hay una desviación grande en las mediciones de campo. En el Oja (Figura 20.b de la Memoria) y en el Jalón (Figura 011, ver también Figura 26.b de la Memoria) se muestra una mejor correlación $E_{0max}-w_{max}$ que en la zona del Jiloca, lo que puede interpretarse como indicación de que no existen graves desviaciones en la calidad de los datos y en el proceso de inversión.

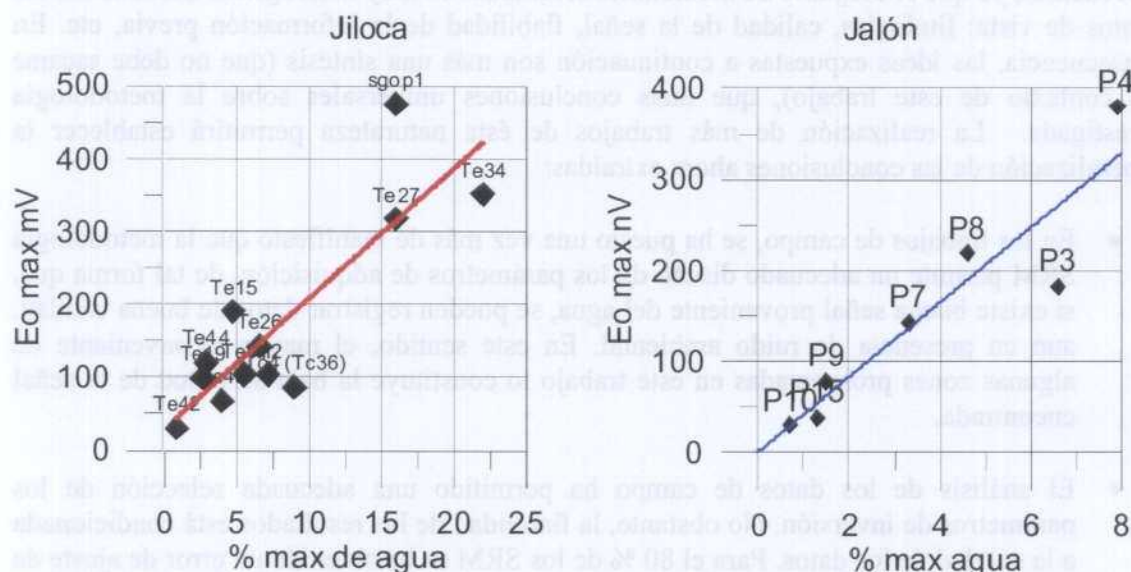


Figura 011. Relación entre la amplitud máxima de la señal medida E_0 y la máxima porosidad calculada w en los ensayos del río Jiloca y Jalón.

Aunque se observa cierta relación entre los parámetros E_{0max} y T_{eb} , las dispersiones existentes no permiten afirmar que la máxima amplitud de la señal medida pueda ser utilizada como un estimador cualitativo de la transmisividad.

08. CONCLUSIONES GENERALES

Este trabajo ha permitido realizar un importante avance en la comprensión y verificación del funcionamiento del método de SRM, siendo uno de sus factores clave la estrecha colaboración mantenida entre geofísicos e hidrogeólogos.

En los párrafos anteriores se han descrito las conclusiones obtenidas tanto del análisis individual de cada SRM efectuado, como del conjunto de las mediciones en un área. La obtención de otro tipo de conclusiones de carácter más generalizado no pensamos que sean procedentes, ya que el conjunto de mediciones efectuadas es muy heterogéneo desde todos los puntos de vista: litologías, calidad de la señal, fiabilidad de la información previa, etc. En consecuencia, las ideas expuestas a continuación son más una síntesis (que no debe sacarse del contexto de este trabajo), que unas conclusiones universales sobre la metodología investigada. La realización de más trabajos de ésta naturaleza permitirá establecer la generalización de las conclusiones ahora extraídas:

- En los trabajos de campo, se ha puesto una vez más de manifiesto que la metodología SRM permite un adecuado diseño de los parámetros de adquisición, de tal forma que, si existe buena señal proveniente del agua, se pueden registrar datos de buena calidad, aun en presencia de ruido ambiental. En este sentido, el mayor inconveniente de algunas zonas prospectadas en este trabajo lo constituye la baja amplitud de la señal encontrada.
- El análisis de los datos de campo ha permitido una adecuada selección de los parámetros de inversión. No obstante, la fiabilidad de los resultados está condicionada a la calidad de los datos. Para el 80 % de los SRM se ha obtenido un error de ajuste de la inversión inferior al 10%.
- La comparación de los resultados de SRM con la información litológica y de posición de las capas acuíferas conocida, pone de manifiesto que las determinaciones efectuadas son buenas, sobre todo cuanto más superficiales son los acuíferos. En cualquier caso, la cantidad total de agua queda bien establecida, siendo constante la suma de los productos de la potencia de cada capa por su contenido en agua.
- El coeficiente de calibración C_p obtenido a partir de la relación $T_{srm} = z C_p w T^2 = T_{eb}$ es consistente para un grupo de SRM cuando la litología es uniforme, y en estos casos podría ser utilizado para el cálculo de la transmisividad en lugares del mismo acuífero donde no existan mediciones en sondeos mecánicos.
- La excesiva variación encontrada para el coeficiente C_p en algunas áreas sugiere que algunos de los datos hidrogeológicos provienen de acuíferos más profundos. Si no es posible realizar una calibración, los valores calculados (utilizando un coeficiente de calibración por defecto) de la permeabilidad y transmisividad sirven como orientación de su variación relativa con la profundidad y entre emplazamientos.
- Este Proyecto ha permitido determinar valores del coeficiente de calibración para diversas litologías de materiales detríticos, oscilando desde $2.5E-06$ para materiales finos, con arcilla, hasta $3E-09$ para gravas limpias. No obstante, estos valores precisan su confirmación con nuevas determinaciones empíricas como las aquí llevadas a cabo.

- Dentro de cada zona, se observa una relación lineal entre los valores de la máxima amplitud de la señal medida E_{0max} y la porosidad máxima calculada w_{max} , para un conjunto de SRM, lo que está en la base del fenómeno físico medido en el método. La separación de este comportamiento en algún SRM indica que el acuífero detectado en ese lugar pertenece a otra litología y/o a otra profundidad que el resto de los lugares medidos. Las discrepancias observadas en estos gráficos pueden ser utilizadas para inferir la presencia de estas situaciones diferentes, o bien la existencia de distorsiones en las mediciones producidas por la variación del ruido durante el periodo de registro.
- La relación de los valores de máxima permeabilidad calculada k_{max} y máxima porosidad w_{max} también debe ser lineal, ya que uno está calculado en función del otro. La existencia de diferentes agrupaciones, para un conjunto de SRM efectuados en una zona, pone de manifiesto la existencia de situaciones hidrogeológicas diferentes, así como la consistencia del coeficiente de calibración obtenido para un grupo de SRM.
- El nivel piezométrico puede ser estimado por interpretación del SRM con precisión mejor de un metro para capas someras (de acuíferos libres).
- Se ha encontrado cierta correlación entre el caudal y los valores de la máxima amplitud de la señal E_{0max} y el valor máximo de la transmisividad calculada T_{srmmx} , cuando la litología de los emplazamientos es uniforme.
- Como consecuencia del análisis y resultados de este Proyecto, se apuntan como líneas a seguir en el desarrollo metodológico de la utilización de los SRM, el uso de información *a priori* para mejora de la inversión, así como tener en cuenta los desfases producidos por terrenos conductores para evitar la aparición de falsos acuíferos en tramos impermeables.
- Es necesario continuar con este tipo de experimentos, siendo un factor clave llevarlos a cabo mediante una estrecha colaboración entre geofísicos e hidrogeólogos.

Referencias:

- Legchenko A., Beuace A., Guillen A., Valla P., Bernard J. 1997 Natural variations in the magnetic resonance signal used in PMR groundwater prospecting from the surface. *European Journal of EEG*,2,173-190
- Legchenko A., Shushakov O., 1998. Inversion of surface NMR data. *Geophysics* 63, 75-84
- Lubczynski M., Roy J. 2004. Magnetic Resonance Sounding: new method for ground water assessment. *Ground Water* vol.42, 291-303
- Plata J., Rubio F., 1999. Sondeos de Resonancia Magnética (SRM). Ensayo en un acuífero detrítico del Sur de España. *Boletín Geológico y Minero* vol.110, 603-626.
- Plata J., Rubio F. 2002. MRS experiments in a noisy area of a detrital aquifer in the south of Spain. *Journal of Applied Geophysics* 50, 83-94
- Plata J., Rubio F., Carceller T., Azcón A., Serrano,J., Arqued, V. 2004. Informe Final del Proyecto Investigación de parámetros hidrodinámicos en acuíferos aluviales de la Cuenca del Ebro mediante Sondeos de Resonancia Magnética. Fondo Documental del IGME.
- Roy J., Luczynski M. 2003. The magnetic resonance sounding technique and its use for groundwater investigations. *Hydrogeology Journal* 11, 455-465
- Yaramanci U., Lange G., Knödel K., 1998 Experiments with surface NMR for improved measurements and inversion. *EEGS 4th Meeting Proceedings*, 853-856

1. ANTECEDENTES Y OBJETIVO

El IGME viene realizando desde 1998 diversos trabajos sobre la puesta a punto y aplicación de un nuevo método de prospección geofísica denominado Sondeos de Resonancia Magnética (SRM). Como consecuencia de ello, dispone en la actualidad de personal cualificado para utilizar la instrumentación necesaria, interpretar las mediciones y valorar con sentido crítico los resultados obtenidos.

Las experiencias prácticas llevadas a cabo apuntan a que los SRM pueden llegar a ser una importante herramienta para la resolución de algunos temas en el campo de la Hidrogeología y de la Ingeniería Geológica y Medioambiental, por su aptitud para detectar directamente la presencia de agua, cuantificarla y evaluar determinados parámetros (porosidad, permeabilidad, potencia) de los niveles acuíferos situados en el primer centenar de metros bajo la superficie del terreno.

El 19 de febrero de 1992 se firmó un Convenio-Marco entre la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) y el entonces Instituto Tecnológico Geominero de España (actual Instituto Geológico y Minero de España), para que el Instituto prestara a la Confederación servicios de estudio y asesoramiento en materia de aguas subterráneas, en temas como la actualización del conocimiento sobre los acuíferos de la cuenca del Ebro. La concreción y desarrollo de estos trabajos se abordaría mediante convenios específicos, cuya financiación se llevaría a cabo al 50% por parte de cada uno de los organismos.

El IGME, en su calidad de Organismo Autónomo de la Administración del Estado, está facultado para efectuar estos Convenios, en virtud de las facultades que le están conferidas por la Ley 13/86, de 14 de abril, de Fomento y Coordinación General de la Investigación Científica y Técnica, y por la Ley 6/97, también de 14 de abril, de Organización y Funcionamiento de la Administración General del Estado. La CHE es el órgano de la Administración competente en el estudio, gestión y planificación de las aguas subterráneas de dicha cuenca hidrográfica, y, en consecuencia, está igualmente facultada para la realización de Convenios, a tenor de las atribuciones que le confiere la normativa vigente.

Por todo cuanto antecede, el IGME y la CHE decidieron en julio de 2002 suscribir un Convenio Específico de colaboración con el objetivo de llevar a cabo la INVESTIGACIÓN DE PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS Y GEOMÉTRICOS EN ACUÍFEROS DETRÍTICOS DE LA CUENCA DEL EBRO MEDIANTE SONDEOS DE RESONANCIA MAGNÉTICA (Ver ANEXO I), cuya realización es el objeto del presente Informe.

2. INTERÉS , JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE DEL ESTUDIO PLANTEADO

La correcta cuantificación de los parámetros hidrodinámicos de los acuíferos es esencial en la gestión de las aguas subterráneas, ya sea para la valoración de reservas de los acuíferos o para la evaluación de procesos dinámicos en régimen natural o influenciado, real o simulado.

Los estudios hidrogeológicos que viene realizando la CHE incluyen la identificación y caracterización de los acuíferos, la evaluación de sus recursos y reservas, el seguimiento e interpretación del estado cuantitativo y cualitativo de las aguas subterráneas, la delimitación de perímetros de protección, el estudio de los términos del balance, y otros, que no pueden prescindir de un soporte numérico establecido sobre la consideración de unos parámetros hidráulicos fiables (porosidad, permeabilidad, coeficiente de almacenamiento y transmisividad).

El método clásico de evaluación de estos parámetros consiste en la realización de pruebas de bombeo, que requieren la existencia de pozos de bombeo y también de sondeos de observación de las adecuadas características y ubicación, no siempre disponibles. El coste económico de ensayos con esas características es elevado y, en todo caso, de una cuantía superior al método alternativo, basado en los SRM, que se espera estudiar con este Convenio, cuyo objetivo es la investigación de la viabilidad del método de Sondeos de Resonancia Magnética (SRM) para la determinación de los parámetros porosidad, permeabilidad y potencia, en distintos tipos de acuíferos detríticos de la cuenca del Ebro.

El método de SRM, que será explicado brevemente en el capítulo siguiente, es una técnica geofísica específica para su utilización en investigación hidrogeológica, permitiendo la detección desde la superficie de la presencia de agua libre en el subsuelo. La calidad de los resultados obtenidos depende tanto de factores geográficos y geológicos (amplitud e inclinación del campo magnético terrestre, susceptibilidad magnética y conductividad eléctrica de las rocas), como ambientales (ruidos electromagnéticos naturales y artificiales). Los datos deducidos en la inversión o interpretación de las medidas de campo permiten cuantificar la distribución de agua en función de la profundidad, adjudicando además a cada tramo un valor (Constante de Tiempo de la señal medida) relacionado con el tamaño de los poros de la formación.

La interpretación de las mediciones está afectada por el principio de equivalencia de resultados, ya que la señal teórica debida a una determinada cantidad de agua es la misma para una capa poco potente con gran contenido en agua por unidad de volumen, que para una capa de mayor potencia pero con menor contenido volumétrico en agua. La determinación de la profundidad de cada capa y la resolución vertical de la función de distribución (potencia de los diversos tramos acuíferos) pueden ser significativamente mejoradas con la utilización de información "a priori", con lo que se consigue además dotar de mayor fiabilidad a la determinación del contenido en agua de cada tramo.

La relación entre la Constante de Tiempo y la permeabilidad viene determinada de forma empírica, basándose en la correspondencia entre diversas litologías y valores medios obtenidos de este parámetro: así, valores entre 300 ms [milisegundos] y 600 ms son característicos de gravas, mientras que valores entre 60 ms y 120 ms se consideran

típicos de arenas finas. La instrumentación actualmente disponible permite la medición de dos Constantes de Tiempo, lo que posibilita realizar una estimación de la permeabilidad de las capas, aplicando algunos de los principios utilizados en las mediciones de resonancia magnética en la testificación de sondeos mecánicos. Esta mejora de la interpretación de los SRM, debido al cambio de escala y forma de efectuar las mediciones entre el método SRM y la testificación, requiere todavía un importante trabajo de desarrollo. Se precisa además de una fase de calibración en cada zona o para cada tipo de litología y granulometría, para lo que se utilizan los resultados obtenidos en ensayos de bombeo, permitiendo así llegar a determinaciones de permeabilidad, transmisividad y caudal específico con un grado elevado de fiabilidad, según las experiencias hasta ahora obtenidas por algunos grupos de trabajo.

Por lo tanto, la consecución de los objetivos planteados en este Convenio viene condicionada por la realidad finalmente encontrada en la calidad de los datos de campo y por la disponibilidad efectiva de parámetros hidrodinámicos previamente determinados, que permitan la calibración del método.

3. CONSIDERACIONES SOBRE EL PROCESO DE MEDICIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS SRM

3.1 Fundamentos teóricos

Para la mejor comprensión del resultado obtenido y de los comentarios técnicos realizados en este Informe, es necesario el conocimiento de una serie de cuestiones básicas sobre el método de SRM. En el **ANEXO II** puede encontrarse una explicación detallada de las bases teóricas y del proceso de medición e interpretación del método de SRM, así como una amplia lista de referencias bibliográficas sobre el tema. En este capítulo se hará sólo una breve descripción.

El fundamento de este método estriba en que toda partícula atómica cargada y en movimiento produce un campo magnético. Estos campos pueden orientarse en la dirección de otros de mayor magnitud; en estado normal, los campos magnéticos de las partículas del átomo están orientados en la dirección del campo magnético terrestre. Si por excitación externa son orientados en otra dirección, una vez cesada la excitación volverán a recuperar su orientación inicial, haciéndolo con un movimiento de precesión (giro de peonza), que produce un nuevo campo magnético de "resonancia". La frecuencia de la precesión depende de la intensidad del campo magnético terrestre y del índice giroscópico de la partícula (constante física para cada elemento, e igual a 0.04258 para el hidrógeno).

En los Sondeos de Resonancia Magnética se utiliza el campo magnético que producen los protones de hidrógeno en precesión. Para que esto sea posible tienen que suceder dos cosas: que existan protones de hidrógeno, y que estos sean previamente excitados por un campo magnético externo. El campo de excitación se introduce desde la superficie del suelo mediante una bobina por la que se hace circular una corriente eléctrica de frecuencia igual a la de precesión del hidrógeno. En la Naturaleza, y dentro de las primeras decenas de metros del subsuelo, es el agua la que contiene prácticamente todo el hidrógeno presente, por lo que la medición de señal SRM es un indicador de la presencia de agua.

Para hacer un SRM en un lugar, se comienza por medir con un magnetómetro la intensidad de campo magnético terrestre **B**, a fin de calcular la frecuencia de precesión de los protones de hidrógeno en ese sitio, mediante la ecuación $f=0.04258 B$.

Tras la extensión de un cable o antena, formando un bucle, sobre la superficie del suelo, se hace pasar por él una corriente eléctrica de la frecuencia anteriormente determinada y de gran intensidad durante un corto tiempo (pulso o momento de excitación **q**, medido en A ms [Amperio por milisegundo]), creando un campo magnético de la misma frecuencia que la de precesión del hidrógeno, y de dirección distinta a la del campo magnético terrestre. Si existe hidrógeno en el subsuelo, sus protones entrarán en precesión al cortar la corriente emisora, perdiendo su excitación mientras que vuelven a orientarse a su posición de equilibrio inicial. En ello tardan un determinado tiempo, durante el cual el campo magnético generado por los protones induce en el bucle de cable extendido sobre la superficie una corriente eléctrica de la misma frecuencia de precesión. Lo que se mide es la amortiguación de dicho campo eléctrico con el tiempo **E(t)**, que es exponencial (Figura 1).

La intensidad máxima (inicial) E_0 de esta f.e.m. [fuerza electromotriz] inducida depende de la cantidad de protones presentes o cantidad de agua. El tiempo T_2^* (constante de tiempo de decaimiento) que tarda en amortiguarse, depende del tamaño medio de los poros donde está contenida el agua, de tal forma que es pequeño para las arcillas y grande para las gravas sueltas; no obstante, el tiempo de amortiguación también depende de la susceptibilidad magnética de las rocas y de su mineralogía, por lo que no existe una relación universalmente válida, necesiéndose calibrar los valores en cada zona. El agua de formación y la contenida en las arcillas dan lugar a constantes de tiempo inferiores a 30 ms, por lo que quedan amortiguadas antes de iniciar la medición de $E(t)$ (se precisa este tiempo para la conmutación de los circuitos de tal forma que la antena pase de ser emisora a receptora).

Si antes de que se amortigüe la señal del primer pulso se emite un segundo pulso, es posible evaluar un segundo tiempo de decaimiento, y, en función de las amplitudes máximas de f.e.m. obtenidas para cada pulso y del intervalo de tiempo entre ambos se calcula un tiempo de relajación T_1 que está relacionado, no ya con el tamaño medio de los poros, sino con la permeabilidad de la formación, siendo además menos dependiente de la heterogeneidad del campo magnético terrestre. Desde el punto de vista instrumental, la emisión de este segundo pulso exige disponer de dos unidades de convertidores. En general, el valor de T_1 es igual a $1.5 T_2^*$.

La profundidad de investigación alcanzada depende de la intensidad del momento magnético emitido, por lo que para obtener información de mayor profundidad, se emite un nuevo momento con mayor intensidad de corriente, y así sucesivamente (hasta 16 veces en una secuencia estándar). En cualquier caso, las dimensiones de la antena suponen un límite para la penetración, que es de un orden de magnitud igual al diámetro del bucle empleado. La información obtenida proviene además de una extensión de terreno de al menos una vez y media dicho diámetro a partir del punto central de aplicación. Este aspecto integrador de valores promediados de un gran volumen del subsuelo es preciso tenerlo en cuenta a la hora de apreciar los resultados obtenidos con un SRM, ya que la permeabilidad de una formación es un parámetro dependiente de la escala considerada.

El bucle o antena extendido sobre la superficie del suelo, además de medir el campo magnético de resonancia, mide también los campos electromagnéticos existentes de otros orígenes, que suponen un ruido externo no deseable. La señal de SRM es del orden de decenas o unos pocos centenares de nV [nanoVoltios], mientras que el ruido puede ser de varios miles de nV. A fin de mejorar la relación señal/ruido, la técnica empleada consiste en emitir el mismo pulso o momento varias veces, sumando la señal recibida (stacking). Si el ruido es aleatorio, esta suma tenderá a reducir su influencia. Además, una forma eficaz de disminuir el efecto del ruido es diseñar la antena en forma de doble bucle en “ocho”, aunque de esta manera, con la misma longitud de cable, la penetración disminuye, ya que el área eficaz de la antena es menor. Si la frecuencia de precesión está próxima a un armónico de 50 Hz [Hercios], la eliminación del ruido producido por las líneas e instalaciones eléctricas resulta más problemática.

El resultado de la medición de un SRM es, por tanto, una colección de n curvas $E(t)$ de decaimiento de la f.e.m. producida por la excitación de cada momento q emitido, en función del tiempo (en la Figura 1 sólo se presentan 10 de estas curvas, por simplificación; en una secuencia estándar se utilizan 16 momentos). En el mismo

instrumento de medición se efectúa un cálculo del valor máximo inicial de cada curva, E_0 , y de la constante de decaimiento T_2^* . Las funciones $E_0(q)$ y $T_2^*(q)$ son el resultado final del proceso de medición. Si se ha medido con dos pulsos, se obtiene además una función $T_1(q)$.

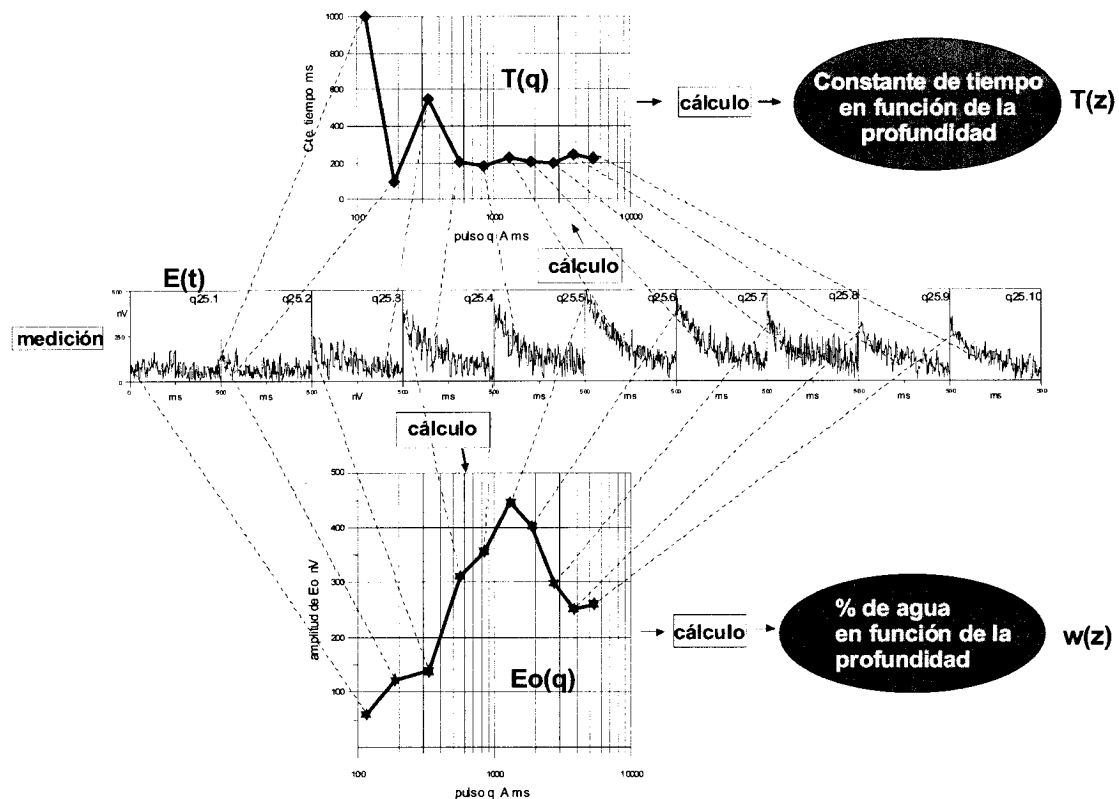
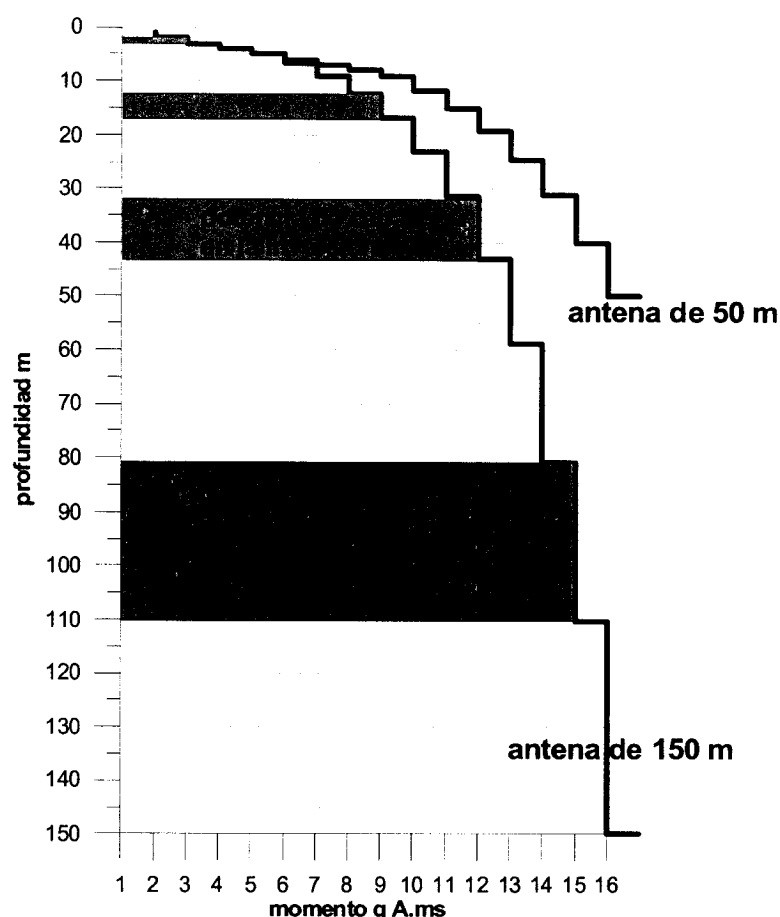


Figura 1: Esquema del registro y elaboración de los datos de un SRM

La inversión o interpretación consiste en convertir los valores $E_0(q)$ y $T_2^*(q)$ en la distribución, en función de la profundidad, del tanto por ciento de agua $w(z)$ (porosidad), de $T_2^*(z)$ y de $T_1(z)$ (indicadores litológicos y de permeabilidad, ver párrafo 3.4). Los cálculos del proceso de inversión se apoyan en una matriz numérica que tiene en cuenta el modelo geoelectrico del lugar, el tipo de antena utilizado y la inclinación del campo magnético terrestre. El proceso consiste, en síntesis, en calcular la respuesta teórica de un modelo del subsuelo formado por un conjunto de capas de potencia determinada, variándose la porosidad (y/o la constante de tiempo) de las mismas hasta encontrar la mejor coincidencia con los valores realmente medidos. La calidad de la inversión se estimada por un error de ajuste en % de las diferencias entre las medidas y la solución teórica..

En un proceso estándar, el terreno queda automáticamente dividido en tantas capas como momentos de emisión se hayan utilizado en el SRM, hasta una profundidad máxima igual a las dimensiones de la antena utilizada (lado del cuadrado, o de uno de los cuadrados en caso de utilizar una antena en forma de "ocho"). La potencia de cada capa es creciente con la profundidad (iguales en escala logarítmica) y depende de la

antena utilizada. En la Figura 2 se indica esta distribución para las antenas de 50 m y 150 m, para 16 momentos de emisión. En caso de utilizar un número inferior de momentos, la profundidad máxima se mantiene, pero la potencia de cada capa se ajusta convenientemente. Es posible, no obstante, realizar una distribución distinta por selección manual de la misma, para lo que hay que disponer de criterios suficientes en los que apoyar dicha distribución. Al analizar los resultados de la inversión de un SRM, hay que tener por lo tanto en cuenta que la resolución es decreciente con el aumento de la profundidad, y que el contenido en agua para las capas más profundas puede encontrarse realmente condensado en sólo una parte del tramo obtenido como resultado de la inversión.



3.2 Estimación de parámetros hidrodinámicos

A partir de las mediciones de campo de un SRM, es posible obtener estimaciones de algunos parámetros hidrodinámicos, y en particular de la porosidad eficaz y de la permeabilidad.

Dada la secuencia de medición utilizada, la respuesta de un SRM se debe solamente al agua libre, estimándose a partir de E_0 la relación w entre el volumen de agua que ha provocado la respuesta medida y el volumen total de subsuelo afectado por la medición. En rigor, para obtener la porosidad eficaz m_e a partir del valor w de contenido en agua se precisa un factor de calibración C_w que puede ser obtenido por mediciones en laboratorio:

$$m_e = C_w V_{\text{libre}}/V_{\text{total}} = C_w w$$

Para acuíferos confinados, en zona saturada w puede considerarse igual a m_e . El contenido en agua libre por metro cuadrado vendría dado por

$$V_{\text{libre}}^m = C_w \sum w(z) \Delta z$$

siendo $w(z)$ el contenido en agua calculado para una capa a la profundidad z y potencia Δz .

La permeabilidad hidráulica k (m/s) puede obtenerse así mismo mediante calibración, a partir de los valores de T_1 o de T_2^* ($T_1 \cong 1.5 T_2^*$), aunque es más fiable hacerlo con T_1 , por su menor variación con la susceptibilidad de las rocas. Ambos tiempos representan un valor dependiente de la relación entre el volumen ocupado por los poros que contienen el agua libre y la superficie total de dichos poros. Se ha encontrado la siguiente relación empírica entre la permeabilidad y los valores de w y T (nos referimos aquí tanto a T_1 como a T_2^*):

$$k = C_p w^a T^b$$

donde a y b son constantes dependientes del tipo de rocas, cuyos valores empíricos actualmente más empleados oscilan entre $a=1-4$, $b=2$, y C_p es el factor de calibración, cuyo valor será distinto según la constante de tiempo utilizada. Para los cálculos w se expresa en tanto por uno, y el tiempo en segundos.

El valor obtenido para el coeficiente C_p a partir de mediciones de la permeabilidad k en laboratorio no ha demostrado ser representativo de las condiciones reales de ejecución de un Sondeo de Resonancia Magnética, posiblemente debido a las diferencias de volumen de roca considerado. Para su determinación debe, por tanto, utilizarse el valor de la transmisividad T_{eb} conocido a partir de ensayos de bombeo. La transmisividad T_{srm} (m^2/s) vendría dada por $T_{srm} = k \Delta z$ para cada capa, y para el conjunto de capas pertenecientes a un mismo acuífero, por

$$T_{srm} = C_p \sum w^a T^b \Delta z = C_p F_i$$

donde se asume que se trata de litologías uniformes, por lo que el coeficiente C_p de todas las capas es único. De esta forma el factor de calibración se obtendrá por

$$C_p = T_{eb} / F_i$$

siendo obvio que los valores de T_{eb} y de F_i deben referirse al mismo acuífero. Una vez calculado este valor, podría utilizarse para calcular la transmisividad a partir de las mediciones de SRM efectuadas en otros lugares del mismo acuífero, aunque en esos sitios no se disponga de ensayos de bombeo.

Cuando en una zona existe un conjunto de SRM donde se conoce el valor de T_{eb} puede calcularse un factor de calibración único para todo el acuífero (siempre que éste sea de litología uniforme, para asumir que el valor del coeficiente es parecido), mediante:

$$C_p = \Sigma T_{eb} / \Sigma F_i$$

La utilidad de este sistema de calibración estriba en poder suministrar un valor más representativo para utilizar las mediciones de un SRM en la estimación de los valores de permeabilidad y transmisividad en un lugar donde no existan ensayos de bombeo, siendo de nuevo obvio que esto no tendrá sentido si las condiciones litológicas no son análogas a las de los lugares de calibración.

Los valores de C_p deducidos en algunos experimentos ya realizados son del orden de $1.5 \cdot 10^{-8}$ a $1.5 \cdot 10^{-10}$ cuando se emplea T_1 , y $3.2 \cdot 10^{-8}$ a $6.1 \cdot 10^{-11}$ cuando se utiliza T_2^* , para todo tipo de litologías. En arenas y arcillas, tomando $a=1$ y $b=2$, se ha obtenido $C_p=1.65 \cdot 10^{-10}$.

3.3 Selección de parámetros de inversión

El proceso de inversión utilizado con los datos tomados en este Proyecto se ha llevado a cabo con el programa SAMOVAR v 4.041, facilitado por IRIS junto con la instrumentación NUMIS PLUS.

Este proceso consta de dos fases:

- 1/ obtención de los valores E_0 , T_2^* y T_1 a partir de las curvas $E(t)$, para cada momento de emisión q
- 2/ conversión de las funciones $E_0(q)$, $T_2^*(q)$ y $T_1(q)$ en $w(z)$, $T_2^*(z)$, $T_1(z)$ y $k(z)$, que es la fase de inversión propiamente dicha, y para lo que es preciso disponer de la matriz con el modelo geoeléctrico del terreno.

Los valores obtenidos en la inversión es evidente que dependen de los valores de partida y del proceso de cálculo, y por ello es preciso puntualizar algunas cuestiones:

- finalizada la medición de un SRM en campo, el propio software de adquisición efectúa un cálculo previo de los valores E_0 , T_2^* y T_1 a partir de las curvas $E(t)$ (contenidas en los ficheros srm.0q), proporcionando las correspondientes funciones $E_0(q)$, $T_2^*(q)$ y $T_1(q)$ (ficheros con extensión denominada .inp e .in2). Estos valores

son brutos, sin aplicar a las medidas más filtros que los propios del proceso analógico de detección síncrona de la señal.

- en la fase de proceso por SAMOVAR se parte de nuevo de las funciones $E(t)$, pero antes de calcular $E_0 T_2^*$ y T_1 se someten a un filtrado digital, con la finalidad de eliminar el ruido en la medida de lo posible y calcular así mejores valores de partida para la inversión. De estos filtros, es forzoso seleccionar uno de estos dos:

. paso banda, para dejar pasar sólo una banda de frecuencias entorno de la de resonancia

. running average: suavizado por valores promediados en una ventana de n ms. Cuanto mayor es la longitud de la ventana, menores serán los valores de E_0 y en ocasiones, puede disminuir el valor de T_2^*

Un filtro opcional es el de Notch, en la banda de 50 Hz, para amortiguar el efecto de la inducción de líneas eléctricas. Cuando la señal es muy débil y su frecuencia es muy próxima a un múltiplo de la de inducción de líneas (1850, 1900 Hz), la aplicación del filtro Notch puede ser perjudicial, porque elimina también la poca parte de señal que hay, distorsionando aun más los resultados.

Figura 3: Consola de entrada de datos y parámetros de proceso en la inversión de un SRM mediante el programa SAMOVAR

Otros parámetros del proceso de inversión son el factor de regularización y el número de capas. Ambos afectan al mayor o menor suavizado de la distribución de valores con la profundidad, y pueden dejarse a selección automática por el programa, a falta de criterios firmes en que justificar su valor. Finalmente, si se ha medido T_1 , para calcular la permeabilidad es preciso introducir un factor de calibración (constante C_{px}), que por defecto es $7 \cdot 10^{-9}$.

En el proceso efectuado en este Proyecto, en cada caso se han aplicado los filtros y parámetros más adecuados, según el tipo de ruido encontrado, calidad de las curvas e información disponible. El criterio seguido ha sido el de elegir la longitud del filtro de running average o "time constant" con el que se obtiene la mejor relación señal/ruido y menor error de ajuste. En algunos casos, se han eliminado (black list) los puntos donde el valor del ruido es mucho mayor que la señal, o especialmente dudosos. El filtro Notch no se ha utilizado cuando se han comprobado evidencias de distorsión de la señal, a pesar de que su espectro contenga armónicos de inducción de líneas.

El factor de regularización se ha dejado en cálculo automático, ya que no se dispone de criterio para una selección manual del mismo. El factor C_{px} ha sido objeto de especial tratamiento, partiendo de los datos suministrados por ensayos de bombeo (a los que se ha dado preferencia como valor de referencia) para calibrar las mediciones de SRM.

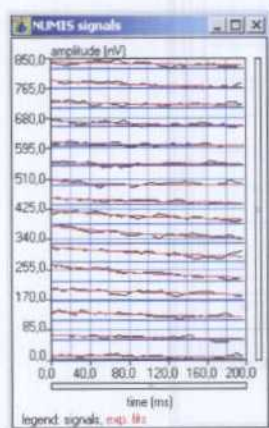
Las matrices de inversión se han preparado partiendo de datos conocidos por campañas de Sondeos Eléctricos Verticales, promediando los valores para cada zona, aunque según la experiencia adquirida por el IGME, la exactitud del modelo inicial no es crítica para los resultados.

En el **ANEXO VIII** se suministra información sobre los formatos de los ficheros de las mediciones de campo y los obtenidos en el proceso de datos.

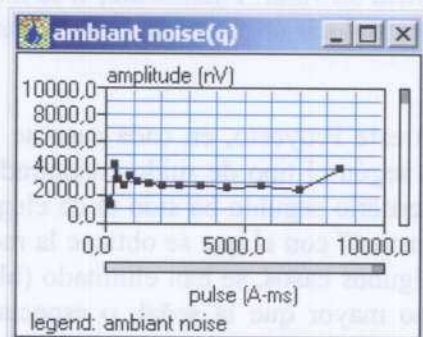
3.4 Presentación de los resultados

Los resultados de la medición e interpretación de cada SRM se presentan de forma gráfica y numérica. Los gráficos son los siguientes:

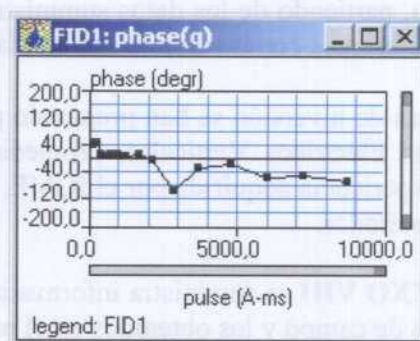
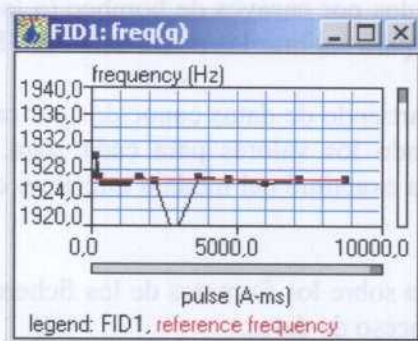
- Curvas $E(t)$ para cada momento q , con escala de amplitudes arbitraria, que no tiene más objeto que visualizar el aspecto de las curvas de campo tras la aplicación de los filtros de proceso.



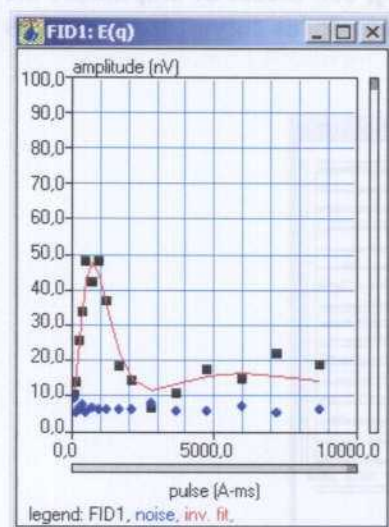
- Curvas de **ruido ambiental** en función del momento **q** aplicado, **Namb(q)**. Se han utilizado escalas homogéneas para todo el informe (10000 nV y 10000 A ms), a fin de facilitar la comparación.



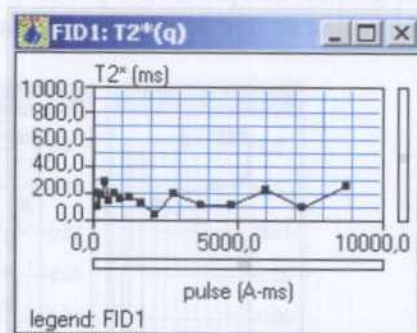
- Curvas de **frecuencia(q)** y **fase(q)**, con escalas verticales variables para cada zona de trabajo, en función de los valores encontrados. Dan indicación de la calidad de las mediciones.



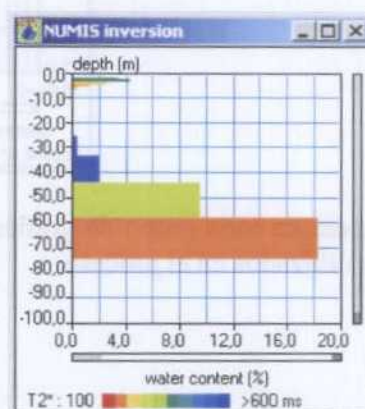
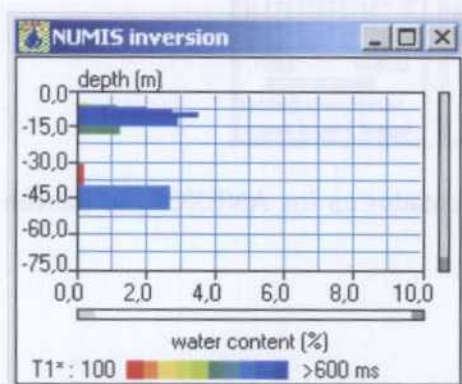
- Curvas **E₀(q)** (valor FID1), junto con el ruido filtrado y sumado (noise) y la curva teórica correspondiente al modelo resultado de la inversión (inv.fit.). La diferencia entre los valores teóricos del modelo y los realmente medidos, se especifican cómo un tanto por ciento respecto del valor medido, siendo este % indicativo del error o desviación de la inversión.



- Curvas $T_2^*(q)$



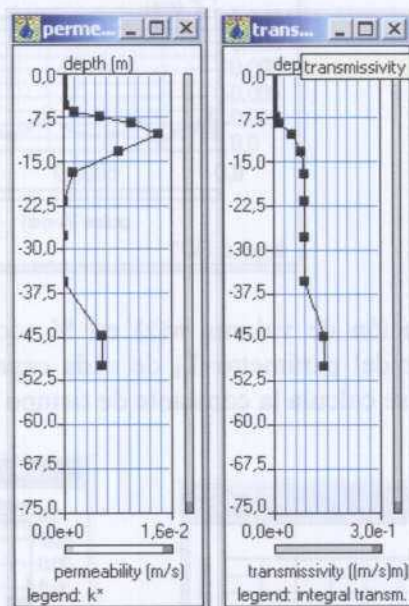
- Gráfico de distribución de valores $w(z)$ en %, con escala superpuesta de color indicativa del valor del parámetro T_1 de cada capa. Si no se ha medido con dos convertidores, sólo se calcula la constante de tiempo T_2^*



En la siguiente tabla se indica la relación empírica entre el valor de T_2^* y la litología (tamaño medio de los granos), y a su vez con T_1 , aceptando que este valor es aproximadamente $1.5 T_2^*$. Se indica también la gama de colores de representación que corresponde a cada constante. En el uso de esta información debe tenerse en cuenta que se trata de indicaciones aproximativas, basadas en aspectos generales del fenómeno físico de la resonancia magnética protónica, y no calibradas expresamente para la zona de trabajo.

relación entre valores de las constantes de tiempo, la litología y el color de las escalas de representación				
$T2^*$ ms	color $T2^*$	litología	$T1$ ms	color $T1$
<30		arcilla	<45	
30-60	Rojo	arenas muy finas, arenas arcillosas	45-90	rojo
60-120	Rojo a naranja	arenas finas	90-180	naranja a naranja claro
120-180	naranja claro	arenas medias	180-270	amarillo
180-300	amarillo-a verde claro	arenas gruesas, arenas con grava	270-450	verde claro a azul
300-600	verde oscuro a azul	gravas	450-900	azul claro a oscuro
>600		agua	>900	

- Gráficos de distribución de la permeabilidad $k(z)$ m/s y de la Transmisividad(z) m^2/s , presentadas en gráfico independiente y con escalas variables para cada zona de trabajo. La transmisividad se representa acumulada.



En la cabecera de cada grupo de gráficos presentados en los ANEXOS, se indican los parámetros utilizados en el proceso.

Profundidad (m)	Permeabilidad (m/s)	Transmisividad ((m/s)m)
0.0	0.0e+0	0.0e+0
-7.5	0.0e+0	0.0e+0
-15.0	0.0e+0	0.0e+0
-22.5	0.0e+0	0.0e+0
-30.0	0.0e+0	0.0e+0
-37.5	0.0e+0	0.0e+0
-45.0	0.0e+0	0.0e+0
-52.5	0.0e+0	0.0e+0
-60.0	0.0e+0	0.0e+0
-67.5	0.0e+0	0.0e+0
-75.0	0.0e+0	0.0e+0

4. PLAN Y EQUIPO DE TRABAJO. SUMARIO DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO

En el Convenio establecido se contemplan las siguientes actividades a llevar a cabo:

- Por parte del IGME:

- Revisión y, en su caso, nueva interpretación de los ensayos de bombeo realizados en las áreas seleccionadas para el trabajo, para determinar los parámetros hidrogeológicos que sea posible atribuir a los distintos tipos de materiales. En la mayor parte de las zonas propuestas también se dispondrá de estudios geofísicos previos (Sondeos Eléctricos Verticales y Sondeos Electromagnéticos en el Dominio de Tiempos).
- Planteamiento de un programa de trabajos de campo para la realización de los Sondeos de Resonancia Magnética. Esta programación se realizará mediante el establecimiento del correspondiente cronograma y la preparación de ortofotos y mapas a escala 1:5.000 a partir de la información contenida en el GIS-Ebro que opera la Oficina de Planificación Hidrológica de la CHE, así como con las necesarias visitas sobre el terreno.
- Desarrollo de los trabajos de campo con una duración de cuatro semanas.
- Interpretación y análisis de los resultados. Redacción de una memoria explicativa que contenga el desarrollo de los trabajos llevados a cabo, discusión de resultados y las conclusiones alcanzadas, con especial énfasis en la valoración de la idoneidad del método para el fin perseguido. En el caso de obtener resultados favorables se programarán y valorarán trabajos futuros para la investigación sistemática de parámetros hidrogeológicos en los principales acuíferos de la cuenca del Ebro con características similares a los investigados.

- Por parte de la CHE:

- Recopilación de la información geofísica e hidrogeológica existente sobre las zonas de trabajo.
- Confección de la cartografía necesaria, con mapas a escala 1:5.000 y mayores, a partir de la información contenida en el GIS-Ebro que opera en la Oficina de Planificación hidrogeológica de la CHE, así como la preparación de ortofotos.
- Participación en el desarrollo de los trabajos de campo con una duración de cuatro semanas.
- Alquiler y transporte de ida y vuelta desde Francia del equipo NUMIS de Sondeos de Resonancia Magnética.
- Participación en la discusión de los resultados y en la edición del Informe Final.

El equipo participante ha estado formado por:

- IGME:

- Personal técnico: Juan Luis Plata Torres, Félix Manuel Rubio Sánchez-Aguililla, José Javier Navas Madrazo, Antonio Azcón.
- Asistente de campo: Agustín González

- CHE:

- Personal técnico: Víctor Arqued Esquíu, Teresa Carceller, Isabel Sánchez, Jesús Serrano Morata (Hidrogeólogo de ZA)

Durante los trabajos de campo se recibió temporalmente la asistencia de Jean Bernard, de Iris Instruments.

Para la realización de estos trabajos el IGME ha preparado el Proyecto interno 2002/006 "RESONANCIA MAGNÉTICA EN EL EBRO", cuyo sumario de ejecución, distribuido por Paquetes de Trabajo es el siguiente:

P1) Selección de las áreas para la toma de medidas de SRM: La selección de áreas ha constituido la primera etapa de la realización del Proyecto. Los criterios tenidos en cuenta han sido la disponibilidad de la suficiente información sobre la geometría y parámetros hidráulicos del acuífero, el nivel de ruido electromagnético existente, la accesibilidad a la zona y las condiciones topográficas y culturales adecuadas para la extensión de los bucles de cable. Tras la primera fase de la selección efectuada por la CHE, en base a la información contenida en el GIS-Ebro, se mantuvieron reuniones de trabajo IGME-CHE, y las zonas se localizaron sobre ortofotos y mapas a escala 1:5.000. Sobre estos documentos se pasó a la segunda fase, mediante visita directa al terreno por parte del personal del IGME y CHE, reconociéndose algunos de los múltiples emplazamientos preseleccionados.

P2) Recopilación de la información sobre las zonas seleccionadas: Sobre las áreas finalmente seleccionadas se procedió a recopilar los documentos originales que permitan revisar el alcance y fiabilidad de la información hidrogeológica disponible. Se han recopilado los ensayos de bombeo existentes, las columnas litológicas de los sondeos mecánicos y los trabajos geofísicos, disponiéndose en la mayor parte de las zonas propuestas de estudios mediante Sondeos Eléctricos Verticales. Esta tarea se ha llevado a cabo conjuntamente por el IGME y la CHE.

P3) Asignación de parámetros hidrogeológicos a las formaciones involucradas: El IGME procedió a recopilar y evaluar los ensayos de bombeo existentes en las formaciones a ensayar con objeto de seleccionar las áreas a priori mejor caracterizadas desde el punto de vista litológico e hidráulico y, en función de los resultados, diseñar las campañas de campo. Posteriormente, una vez realizadas las diferentes campañas de SRM, se informatizaron los datos de los ensayos de bombeo y se procedió a simularlos con los parámetros obtenidos en su día y, en caso de ajuste deficiente se reinterpretaron hasta obtener una calibración mas satisfactoria. No siempre fue posible. Esta fase ha sufrido una prolongada realización en el tiempo, no habiéndose dispuesto de todos sus resultados hasta varios meses después de haber finalizado la toma de datos en campo.

P4) Diseño de las campañas de campo: una vez identificadas las áreas donde llevar a cabo los trabajos de campo, se han diseñado, en función de su localización geográfica, época del año y otros condicionantes técnicos y logísticos, un plan de trabajo viable. A la vista de la experiencia adquirida por el IGME en este tipo de mediciones, sobre cada área se han previsto puntos de medición alternativos, ya que la existencia de ruidos electromagnéticos no resulta en muchas ocasiones evidente hasta el momento de intentar efectuar las mediciones.

P5) Toma de datos de SRM en campo: Para la toma de datos en campo se ha utilizado la instrumentación NUMIS PLUS, de Iris Instruments (Francia). Para ello, la CHE procedió al alquiler de la misma y de un vehículo para su instalación y transporte hasta la zona de trabajo, durante un periodo de cuatro semanas. El equipo fue manejado por personal del IGME, que facilitó sobre el terreno dos vehículos y un operador para dirigir las operaciones de preparación de las antenas y búsqueda de emplazamiento de bucles. Durante las operaciones de registro permaneció permanentemente en campo un técnico del IGME. Por su parte, la CHE proporcionó el personal auxiliar necesario para las labores de localización de lugares, implantación y recogida de cables, y un vehículo para transporte de personas y pequeño material, así como un técnico, que fue entrenado por el IGME para poder auxiliar en la operación del instrumento NUMIS PLUS.

P6) Proceso de datos SRM: El proceso de los datos SRM de campo se ha llevado a cabo por el IGME con utilización de los programas facilitados por Iris Instrument.

P7) Interpretación hidrogeológica de los resultados: En la interpretación hidrogeológica de los resultados han intervenido todos los miembros técnicos del equipo, tanto del IGME como de la CHE, cruzando los resultados obtenidos mediante SRM con los suministrados por los ensayos de bombeo, estableciendo una discusión y valoración de los resultados obtenidos.

P8) Redacción del Informe final: La redacción del informe final ha corrido a cargo del IGME, suministrando la CHE su apoyo para la configuración y edición del informe.

P9) Coordinación de las actividades y difusión de los resultados: La coordinación de los trabajos ha sido llevada a cabo por el IGME. La difusión de los resultados se establecerá a través de la adecuada distribución del Informe Final, así como mediante la publicación y presentación de los mismos en Congresos nacionales e internacionales de carácter geofísico o hidrogeológico.

5. AREA DE TRABAJO

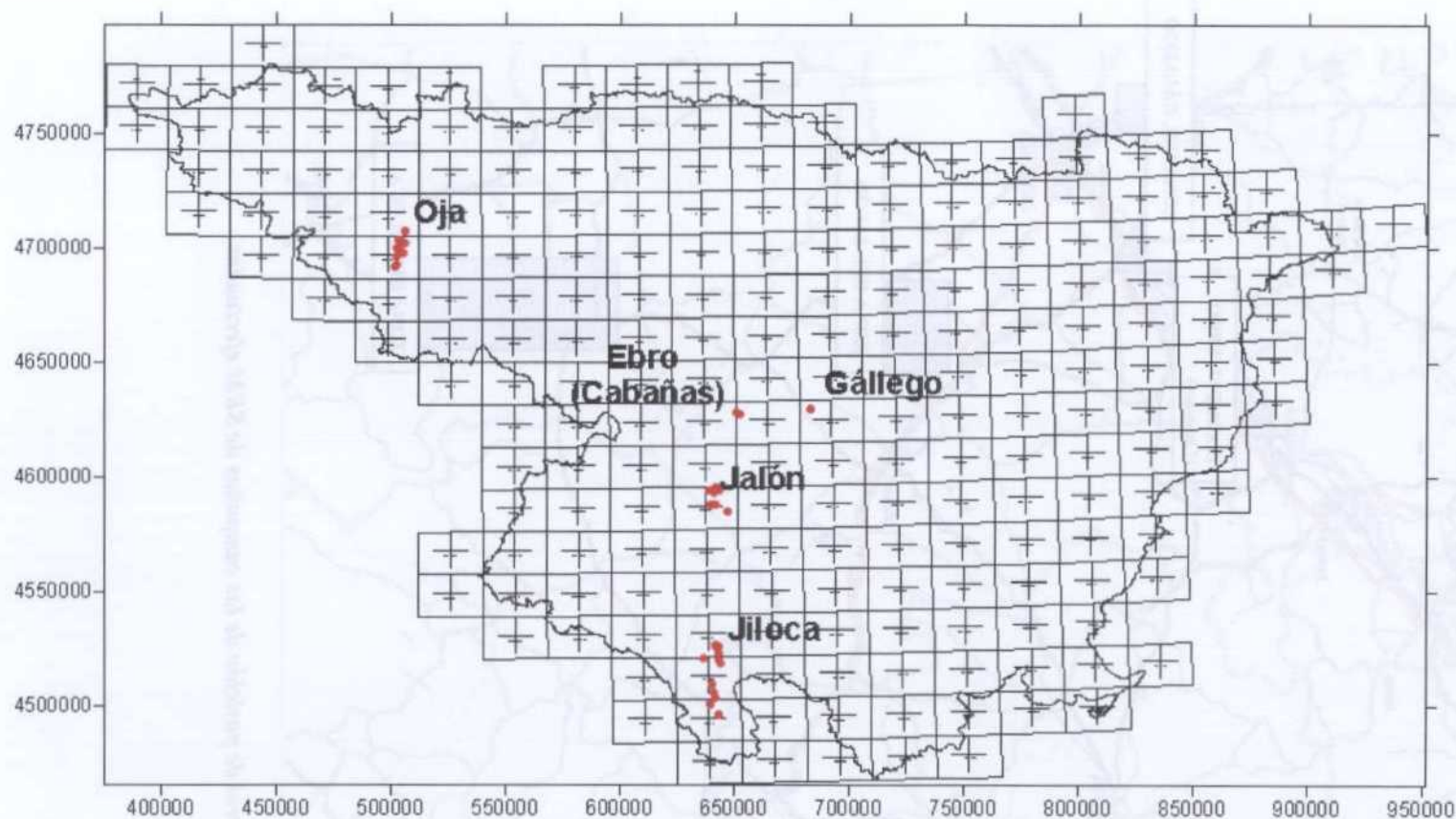
El plan inicial establecido contemplaba como posibles zonas de trabajo los acuíferos aluviales de los ríos Oja, Gállego y Ebro. Posteriormente también se consideraron diversos acuíferos detríticos, no estrictamente aluviales, de la cuenca del Alto Jiloca y de la cuenca baja del río Jalón, al disponer en todos ellos de sondeos de reconocimiento y ensayos de bombeo que permitían una primera valoración de los parámetros litológicos e hidráulicos, concretamente la transmisividad.

En el caso de las formaciones aluviales ensayadas se trata de acuíferos libres instalados en materiales granulares granosostenidos con porosidad intergranular. Son sedimentos formados en ambientes fluviales y de abanicos fluviales, de naturaleza carbonatada y/o siliciclástica, acompañada por una matriz arenosa y arcillosa. En todos los casos se trata de acuíferos muy someros que se apoyan sobre un material de mucha menor permeabilidad de naturaleza arcillosa o margoevaporítica.

Los ensayos realizados en la cuenca baja del Jalón afectan a la Unidad Hidrogeológica del Campo de Cariñena (Jalón), consistente en un sistema acuífero de cierta complejidad. Las zonas ensayadas se sitúan al este de La Almunia, y al este y noreste de Cariñena, en donde se pueden distinguir dos acuíferos superpuestos conocidos en el argot local con el nombre genérico de Acuífero de Alfamén, compuesto por un acuífero pliocuaternario asentado sobre un glacis de espesor muy irregular (hasta 70 m), y un acuífero terciario subyacente consistente en un complejo multicapa en el que niveles detríticos se intercalan en una serie eminentemente lutítica cuyo espesor, muy variable, oscila entre 45 y 220 metros. Los emplazamientos ensayados en el Alto Jiloca afectan a ámbitos representativos de la fosa del Jiloca, en la que, según las zonas, se superponen un acuífero cuaternario (a veces un acuífero trevertínico), un acuífero detrítico terciario y diversos acuíferos mesozoicos carbonatados. En ningún caso se ha pretendido investigar profundidades superiores a 100 metros.

La ubicación de las zonas ensayadas se muestran en las figuras 4A, 4B y 4C, donde además se indican las correspondientes hojas a escala 1:50.000 del MTN donde se ubican.





Posición de los Sondeos de Resonancia Magnética efectuados. Hojas 1:50.000. Coordenadas UTM.

Zona del Jiloca: hojas 491,516,541 Zona del Gállego: hoja 355 Zona del Oja: hojas 202, 169
Zona del Jalón: hoja 410 Zona del Ebro (Cabañas): hoja 354

Figura 4B. Posición de los Sondeos de Resonancia Magnética efectuados sobre el contorno de la Cuenca Hidrográfica del Ebro y su distribución en hojas 1:50.000 del MTN

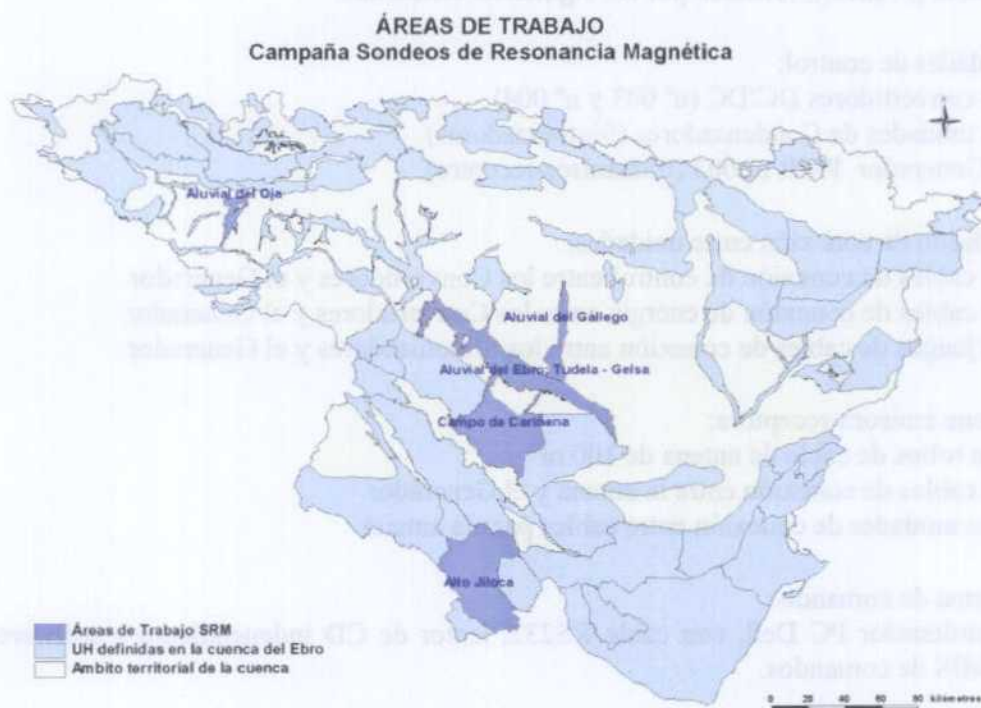


Figura 4C. Situación de las Unidades Hidrogeológicas sobre las que se ha llevado a cabo la campaña de Sondeos de Resonancia Magnética en la Cuenca de Ebro.

6. INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA

De acuerdo con los planes previstos, se ha dispuesto del equipo NUMIS PLUS, de Iris Instruments (Francia), formado por los siguientes elementos:

- Unidades de control:
 - Dos convertidores DC/DC (nº 003 y nº 004)
 - Dos unidades de Condensadores (Sintonizadores)
 - Un Generador PMR nº 003 (transmisor-receptor)
- Cableado de conexión entre unidades:
 - Dos cables de conexión de control entre los Convertidores y el Generador
 - Dos cables de conexión de energía entre los Convertidores y el Generador
 - Dos juegos de cables de conexión entre los Sintonizadores y el Generador
- Antena emisora-receptora:
 - Siete rollos de cable de antena de 100 m
 - Dos cables de conexión entre la antena y el Generador
 - Ocho unidades de conexión entre cables para la antena
- Sistema de comando:
 - Un ordenador PC Dell, con cable RS232, lector de CD independiente y software NUMIS de comandos.
- Instrumentación auxiliar:
 - Una unidad para test de ruido, con cable de conexión y antena pequeña
 - Una bobina compacta para verificación instrumental nº SE 601 GP/C
 - Un magnetómetro de protones
- Sistema de alimentación de energía:
 - Cuatro baterías de 12 V 63 A tipo NPL65-121
 - Diez cables 4 mm para conexión de baterías, con 8 pinzas de cocodrilo
 - Dos cargadores de baterías
 - Una unidad de alimentación de 12 V para el PC

La instrumentación se instaló en un vehículo de gran capacidad facilitado por la CHE; se dispuso además de un turismo (CHE) y un todo-terreno (IGME) para servicio de línea y auxiliar de realización de los trabajos. Durante la ejecución de los trabajos fue sustituido parte del instrumental, por averías en los originariamente recibidos.



Foto 1: emplazamiento de uno de los SRM y vehículo empleado



Foto 2: medición del campo magnético, previa a la realización del SRM, con un magnetómetro de protones



Foto 3: Detalle de la instrumentación instalada en el vehículo de campo



Foto 4: detalle de la instrumentación instalada en el vehículo de campo

7. EJECUCIÓN DE LAS MEDICIONES

Los trabajos de campo se llevaron a cabo desde el 17 de septiembre al 11 de octubre de 2002, desplazándose el equipo a las poblaciones de Monreal del Campo para cubrir las zonas de los ríos Jiloca y Gállego, a Haro, para el río Oja y a Cariñena para el Jalón y Ebro. El primer día se procedió a la recepción del material y a su instalación en el vehículo de campo.

Durante la duración de la campaña, estuvo permanentemente en campo un técnico y un auxiliar del IGME, así como dos técnicos por parte de la CHE, que proporcionó además el personal auxiliar complementario cuando ello fue necesario. El manejo de la instrumentación fue realizado por el IGME, traspasando la metodología de la operación al personal de la CHE.

Con la planificación previamente realizada, mientras se efectuaba la medición de un SRM, un equipo se dedicó a efectuar un reconocimiento preliminar de los puntos seleccionados y del próximo emplazamiento previsto, a fin de verificar su localización, accesos y medición de ruido con la bobina auxiliar que está prevista en la instrumentación NUMIS para estos efectos. En función de los resultados de esta operación, algunos lugares debieron de ser desechados, tanto por exceso de ruido, como por dificultades de otro tipo, procediéndose, con el criterio del personal de la CHE, a la elección de emplazamientos alternativos, que, en ocasiones, no habían sido preseleccionados en la fase de preparación de los trabajos de campo. Todos los lugares han sido debidamente identificados sobre fotografía aérea facilitada por la CHE, así como los sondeos o pozos más próximos, donde, normalmente, fue medido el nivel piezométrico en el día de las lecturas de SRM.

El segundo equipo accedía a los emplazamientos definitivos, procediendo en primer lugar a la medición del campo magnético en el área y al extendido del bucle o antena de medición. Las dimensiones y configuración geométrica de la antena fueron elegidas de acuerdo con la profundidad del acuífero en los distintos sitios y con el nivel de ruido encontrado. Estas operaciones previas, junto con la de recogida posterior de la antena ocupan un tiempo total de unos 30-40 minutos. Antes de proceder a la medición, se efectuaron en todos los lugares pruebas con el equipo completo para verificación de ruido y selección de los parámetros instrumentales: sintonización de la unidad de condensadores, existencia y nivel de la señal, stacking, etc., siguiendo para ello el protocolo indicado por la casa IRIS Instruments. Estos ensayos previos fueron especialmente difíciles en algunos emplazamientos, y, en algún caso, debido a la evolución del ruido a lo largo del día, fue necesario abandonar el lugar sin llegar a efectuar un SRM completo. Una vez determinados los parámetros de medición, se procedió a la misma, ocupando un tiempo que oscila para cada SRM entre 1 h y 4:30 h, dependiendo del stacking realizado, siendo el tiempo total necesario para realizar una medición, incluidos los ensayos previos, de 2 h a 5 h. Estos tiempos tan largos han obligado a realizar un esfuerzo especial del personal en campo, recogiendo los cables al final del día a la luz de los faros de los coches.

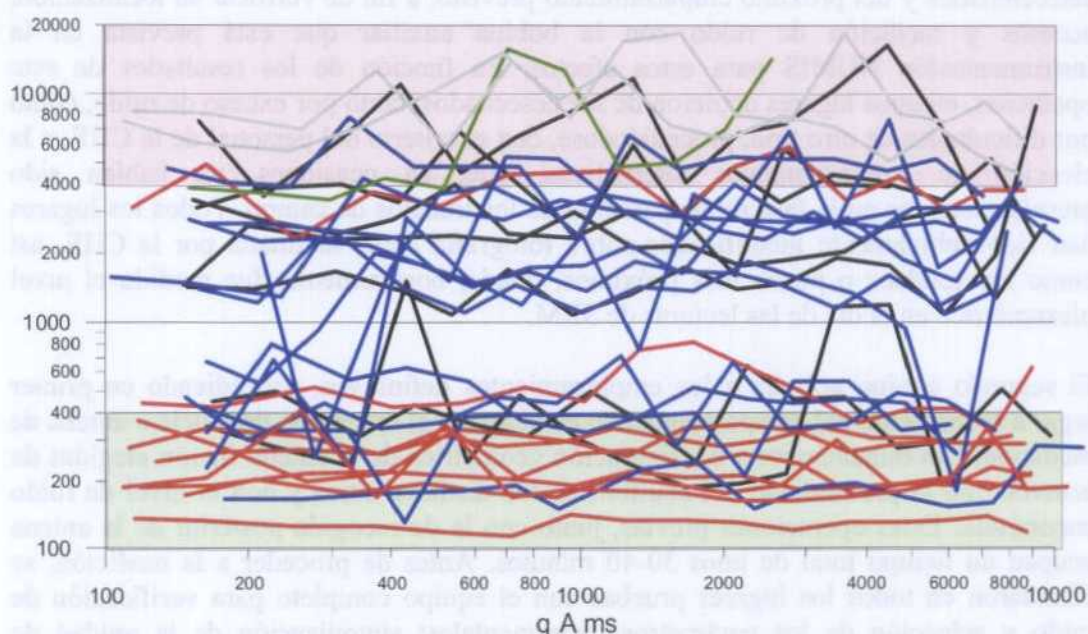
Los trabajos de campo finalmente realizados han tenido lugar en las siguientes áreas (Figura 4) y fechas:

- Río Jiloca: del 18 al 26 de septiembre de 2002, con medición de 12 SRM

- Río Gállego: 27 de septiembre de 2002, con medición de 1 SRM
- Río Oja: 30 de septiembre al 4 de octubre de 2002, con medición de 10 SRM
- Río Jalón (La Almunia): del 7 al 10 de octubre de 2002, con medición de 7 SRM
- Río Ebro (Cabañas): 11 de octubre de 2002, con medición de 2 SRM

con un total de 32 Sondeos de Resonancia Magnética medidos en 17 días, obteniéndose una producción media de 2 SRM por día.

En la Figura 5a se ha representado el nivel de ruido, en función del momento de emisión de cada SRM en todas las zonas registradas en este Proyecto. Hasta 400 nV el ruido puede considerarse aceptable; a partir de 4.000 nV es muy difícil poder obtener registros útiles. El SRM medido en la zona del río Gállego no puede considerarse válido, por haberse producido un exceso de ruido (más de 20.000 nV) durante la medición; en la zona del río Oja, se repitió el SRM 3264 para verificación de la nueva instrumentación recibida, por lo que se dispone en total de 30 SRM válidos.



Ruido ambiental: Jalón, Oja, Jiloca, Gállego, Ebro

Figura 5a Ruido ambiental en nV para todos los SRM realizados en este Proyecto

Para amortiguar el efecto del ruido sobre la señal proveniente del agua del subsuelo pueden emplearse varias técnicas:

- La antena puede diseñarse en forma de doble bucle. Para evitar que esto reduzca también la profundidad de investigación, es necesario no disminuir el lado de cada bucle, lo que no siempre resulta compatible.
- Cuando la fuente de ruido puede ser identificada (líneas eléctricas, fábricas, etc.), la antena puede orientarse de la forma más adecuada.

- Aumentar el stacking o número de pulsos que se emiten para cada amplitud del momento de excitación, también contribuye en gran forma a amortiguar el efecto del ruido, pero aumentando el tiempo de registro, que puede llegar a ser muy grande.

Si el ruido no sobrepasa valores extremos, la utilización de alguna de estas técnicas o su combinación consigue registrar con valores de Señal/Ruido aceptables, siempre que exista una buena señal proveniente del agua. En la Figura 5b se aprecia el resultado final conseguido en esta campaña, en la que para la mayoría de los SRM efectuados se ha conseguido una relación S/R superior a 1.

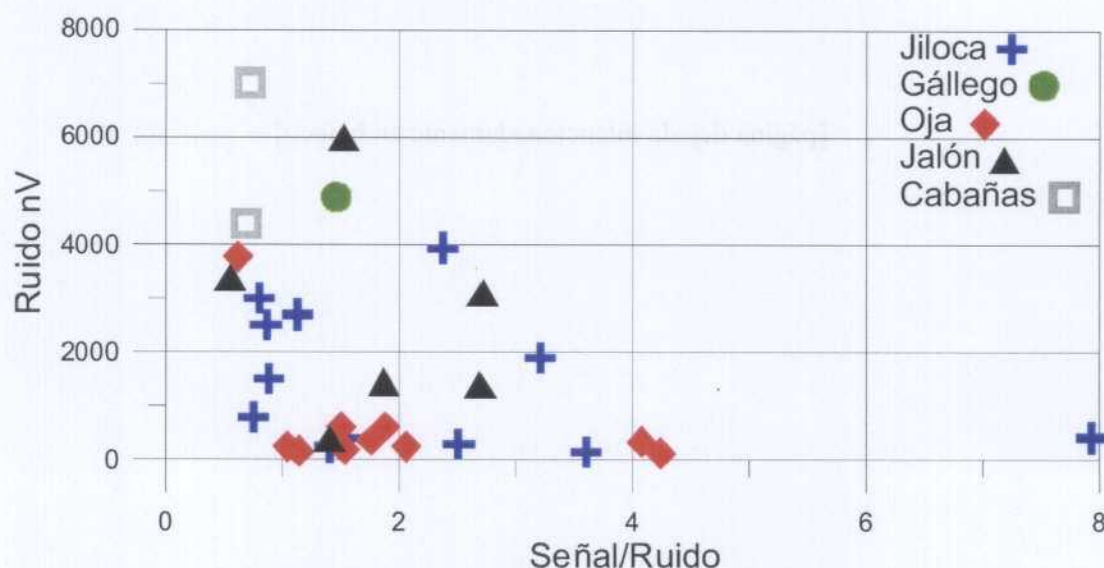


Figura 5b Ruido ambiental en nV frente a la relación Señal/Ruido obtenida en los SRM realizados en este Proyecto

Todos los ficheros de resultados se grabaron en el disco duro del PC de campo, siguiendo una organización y sistema de nomenclatura previamente establecido. Al final de cada día, los datos fueron volcados a copias de seguridad en disquete y preprocesados en oficina de campo. El proceso y análisis final se han llevado a cabo por el IGME en sus oficinas centrales de Madrid-Tres Cantos.

[página dejada intencionadamente en blanco]

8. ZONA DEL ALTO JILOCA

8.1 Hidrología de la Zona

Las zonas ensayadas afectan a diversos ámbitos representativos de la fosa del Jiloca, en donde coexisten acuíferos instalados en los materiales que la rellenan así como en los materiales mesozoicos y cenozoicos del substrato.

La fosa del Jiloca es una estructura estrecha y alargada en dirección NNE-SSO que se extiende desde la zona de Used-Gallocanta hasta Teruel, conformada en su borde oriental por grandes fallas en relevo de rumbo NO-SE y NNE-SSO y en su borde occidental por flexiones y fallas de menor entidad. Se trata de una fosa asimétrica (o semifosa) desarrollada durante el Plioceno Superior-Pleistoceno Superior que afectó a la superficie de erosión que enrasaba las cuencas mio-pliocena con los relieves mesozoicos circundantes. Los límites tectónicos de la fosa están frecuentemente enmascarados por depósitos recientes con morfología de glaciares que enlazan con los niveles superiores del relleno de la fosa.

Desde el punto de vista hidrogeológico, la fosa del Jiloca hace las veces de colector regional de toda la escorrentía subterránea generada en la unidad hidrogeológica conocida como Alto Jiloca, en la que los principales acuíferos son los constituidos por formaciones carbonatadas mesozoicas que afloran en las extensas parameras calcáreas de la margen izquierda de la cuenca y en las sierras de Lidón y Palomera, en la margen derecha. Las otras formaciones acuíferas representadas tienen menor entidad y reciben buena parte de su alimentación por transferencia lateral de los acuíferos mesozoicos: son las constituidas por niveles de conglomerados, gravas y areniscas intercaladas en arcillas y margas del Mioceno-Plioceno Inferior así como las gravas con matriz limo arenosa que colmatan y fosilizan la fosa y su equivalente lateral en zonas de descarga, las calizas tobáceas, frecuentes entre Calamocha y Caminreal. El acuífero aluvial carece de significación al ser el río Jiloca, en gran medida, un dren antrópico excavado en tiempos históricos para la desecación de las numerosas lagunas que jalonaban la depresión.

Todos los ensayos de Resonancia Magnética (SRM) se han efectuado sobre formaciones acuíferas cuaternarias, si bien los sondeos próximos disponibles utilizados para contrastar litologías y evaluar los parámetros hidráulicos no se constriñen a las formaciones superficiales ya que suelen alcanzar en profundidad los acuíferos mesozoicos, los cuales suministran la mayor parte del agua captada. La imposibilidad de discernir la contribución de cada uno de los acuíferos atravesados en la productividad del sondeo dificulta, cuando no imposibilita, la cuantificación de los parámetros que rigen las formaciones superficiales ensayadas.

La situación, sobre un mapa geológico, de los puntos de medida y de los sondeos mecánicos más próximos a los mismos, queda recogida en el **ANEXO III-A**. La información litológica de dichos sondeos está recogida en el **ANEXO III-C**. Todos los SRM se han efectuado sobre el cuaternario, dimensionando las antenas empleadas a la investigación de estos acuíferos.

Antes de describir los resultados obtenidos, es necesario resaltar una serie de aspectos que se han encontrado al ir realizando los respectivos análisis de la información:

- La información previa disponible, a priori extensa, ha resultado insuficiente para caracterizar los acuíferos superficiales objeto de los SRM.
- Los datos sobre parámetros hidráulicos provienen mayoritariamente de sondeos del IRYDA, destinados a prospectar grandes caudales de agua, por lo que el proyectista despreciaba los acuíferos suprayacentes de menor entidad y se centraba en captar el acuífero kárstico profundo.
- Se han encontrado importantes desacuerdos entre las descripciones litológicas de los sondeos y su acabado real final, concretamente en la posición de las zonas filtrantes.
- Los ensayos SRM se realizaron después del estiaje veraniego, por lo que los niveles acuíferos más superficiales estaban exhaustos.
- Todas las circunstancias anteriores han determinado que la zona del alto Jiloca no haya resultado en su conjunto idónea para su investigación mediante SRM.

8.2 Toma de datos en campo

La campaña de SRM en el valle de Jiloca tuvo lugar entre los días 18 y 26 de Septiembre de 2002, midiéndose 12 sondeos.

Inicialmente se habían seleccionado una serie de emplazamientos coincidentes con sondeos mecánicos de los que se dispone de columna litológica e información hidrogeológica, repartidos a lo largo de todo el valle del Jiloca y distribuidos en 5 zonas o “perfiles”. Debido al alto nivel de ruido existente, junto con la baja intensidad de la señal encontrada en bastantes de los lugares preseleccionados, fue necesario modificar el planteamiento inicial, midiéndose finalmente en los sitios relacionados en el siguiente cuadro, donde se indican las principales características de las mediciones:

ZONA	FECHA	SRM	SONDEO	ht	hm	T	ANTENA	f Hz	Q	STACK	RUIDO nV	B nT	inc. B	S/R	cali
JILOCA	19-sep-02	SGOP1	2619-7-047	4:00	2:00	T2	oo de 75	1905	16	64	3940	44749	8	2,38	B
JILOCA	20-sep-02	TE15	2619-7-029	3:15	2:35	T1	oo de 75	1905	15	64 (96)	2500	44717	35	0,87	R
JILOCA	20-sep-02	TE34	2620-3-031	4:15	2:45	T2	oo de 75	1905	16	32 (48)	1500	44767	50	0,89	M
JILOCA	23-sep-02	TE11	2620-3-011	2:35	2:05	T2	oo de 75	1906	16	32	800	44744	25	0,76	M
JILOCA	23-sep-02	VI2	2620-7-005	5:20	2:50	T1	oo de 75	1904	15	64	2700	44716	25	1,14	M
JILOCA	24-sep-02	TE19	2620-2-011	2:30	1:30	T2	0 de 100	1906	16	64	1950/3000	44734	26	0,81	R
JILOCA	24-sep-02	TE45	2620-7-034	4:00	1:50	T1	oo de 75	1903	14	64	300	44655	17	2,52	MB
JILOCA	25-sep-02	TE44	2620-7-037	3:45	3:00	T1	oo de 75	1903	16	64	250/3320	44622	22	1,42	B
JILOCA	25-sep-02	TC36 (Te04)	2621-3-037	2:05	1:20	T1	oo de 50	1900	16	32	160	44613	3	3,61	MB
JILOCA	25-sep-02	TE42	2621-3-073	3:30	2:10	T1	oo de 75	1903	15	36	400	44651	44	1,55	R
JILOCA	26-sep-02	TE26	2619-7-034	4:45	0:50	T1	oo de 75	1906	14	48	422	44734	5	7,93	B
JILOCA	26-sep-02	TE27	2619-7-037	2:00	1:50	T1	oo de 50	1906	16	64	1900	44742	15	3,22	MB

Tabla srmmedicionJILOCA

SRM: nombre adjudicado al SRM y a su fichero de datos

Sondeo: nombre del sondeo mecánico más próximo

ht: tiempo total en horas empleado, incluyendo desplazamiento entre sondeos, extensión y recogida de la antena, medición de test, configuración instrumental, etc.

hm: tiempo en horas de la medición final

T: T1 indica que se ha medido con dos convertidores, por lo que puede estimarse valores de permeabilidad con el parámetro T_1 .

Antena: configuración del bucle utilizado como antena emisora-receptora

fHz: frecuencia de emisión, calculada por la medición del campo magnético B (nT) en cada zona ($f=0.04258 \text{ B}$)

Q: número de momentos de emisión registrados

Stack: número de pulsos sumados en la medición para cada momento.

Ruido nV: nivel de ruido ambiental medido en el emplazamiento

B: intensidad media del campo magnético terrestre en el área de la antena el día de la medición en nT

Inc. B: máxima variación de B en el área de la antena

S/R: relación Señal/Ruido, obtenido tras el proceso de los datos (valor indicativo, que puede diferir según los parámetros de proceso seguido)

Cali: estimación subjetiva de la calidad final del SRM, en una escala de MB B R M MM

ZONA DEL JILOCA

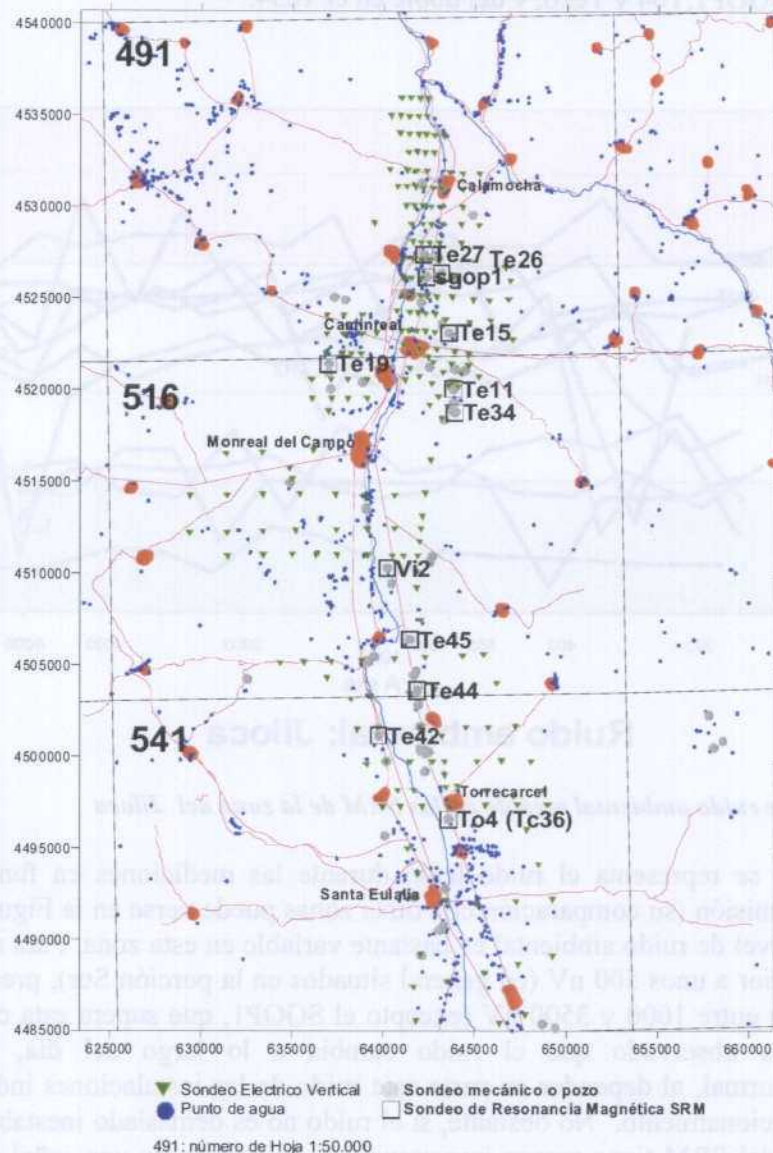


Figura 6. Mapa de posición de los SRM en la zona del Jiloca. Hojas 1:50000 n° 491, 516 y 541. Coordenadas UTM

Su situación en el Valle del Jiloca se encuentra recogida en la Figura 6, en coordenadas UTM. La posición de detalle de los bucles utilizados, con indicación de la situación de

los sondeos mecánicos más próximos, está recogida en el **ANEXO III-B** sobre fotografía aérea.

El tipo de antena empleado ha sido de dos bucles en ocho de 75 m ó de 50 m de lado, excepto en el SRM Te19, donde se utilizó un cuadrado de 100 m, dada la mayor profundidad del acuífero a estudiar, según la información disponible de los sondeos mecánicos. El campo magnético terrestre, entorno a las 44.700 nT, presenta una variación de hasta 150 nT entre todos los emplazamientos, lo que produce diferencias de hasta 6 Hz en la frecuencia de resonancia. Dentro del área de cada SRM las diferencias de campo magnético oscilan con valores del orden de unas 25 nT (1 Hz), siendo inferiores en el SGOP1, T04 y Te26, y del doble en el Te34.

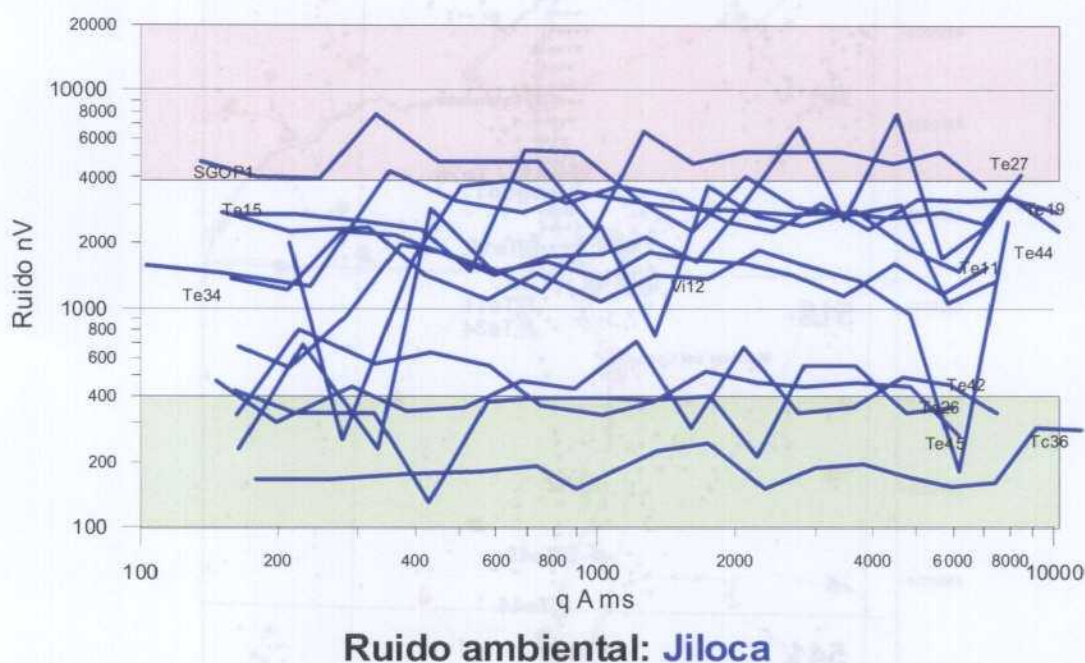


Figura 7. Nivel de ruido ambiental medido en los SRM de la zona del Jiloca

En la Figura 7 se representa el ruido leído durante las mediciones en función del momento q de emisión (su comparación con otras zonas puede verse en la Figura 5). Se aprecia que el nivel de ruido ambiental es bastante variable en esta zona. Para un grupo de SRM es inferior a unos 500 nV (en general situados en la porción Sur), presentando el resto un ruido entre 1000 y 3500 nV (excepto el SGOP1, que supera esta cifra). En ocasiones se ha observado que el ruido cambia a lo largo del día, cuestión absolutamente normal, al depender en parte este ruido de las instalaciones industriales que estén en funcionamiento. No obstante, si el ruido no es demasiado inestable, sobre la calidad final del SRM tiene mayor importancia la existencia de una señal de cierta amplitud; así, puede observarse que mientras que el nivel de ruido es elevado en el SRM Te27, la relación S/R es de 3.22, dando lugar a un buen resultado, mientras que en el Te42, aunque el ruido es bajo, la relación S/R es de 1.55, dando un resultado de calidad regular.

La amplitud máxima de la señal registrada se encuentra entre los 85 nV y los 484 nV, excepto en los SRM Te45 y Te42, donde solamente alcanza 65 nV y 25 nV respectivamente. El stacking empleado en la medición ha oscilado entre 32 y 64; en los casos en que se señala un segundo número entre paréntesis, se refiere a que en algún momento se aumentó el número de pulsos adicionados, lo que puede producir alguna distorsión en el resultado final.

8.3 Matriz de Inversión

Para el cálculo de la matriz de inversión se ha contado con los datos procedentes de los informes: “*Campaña preliminar de geofísica. Proyecto de Investigación Hidrogeológica en el valle del Jiloca*” de marzo de 1978, archivado en el centro de documentación del IGME con el número 40168, e “*Investigación Hidrogeológica en el valle del Jiloca (2ª. Fase) 1978*, número 34062, que proporcionan la cobertura de SEV indicada en la Figura 6.

La interpretación de los SEV próximos a los sondeos mecánicos en donde se han realizado las medidas SRM es la siguiente:

Sondeo	nº inventario	ohm.m	Potencia m
SGOP1	2619/7/47	235	50
		16	
Te 26	2619/7/0034	235	50
		16	
Te 15	2619/7/029	290	25
		21	
Te 11	2620/3/011	230	40
		20	
Te34	2620/3/031	285	40
		30	
Te 19	2620/2/011	36	
Vi 2	2620/7/005	360	25
		44	
Te 44	2620/7/037	240	50
		64	
Te 45	2620/7/034	240	50
		64	
Te 4(Tc36)	2621/3/037	70	20
		38	
Te 42	2621/3/073	340	25
		400	

Con lo que se ha elaborado un modelo geoelectrico general de la zona, realizando un promedio de todos estos puntos:

φ (Ω m)	E (m)
250	40
30	

Solamente los sondeos TE 19, con un paquete de 36 Ω m a lo largo de los 100 primeros metros, y el TE 42, con un segundo tramo resistivo (400 Ω m), presentan un comportamiento diferente.

Con este modelo se ha calculado una matriz para cada tipo de bucle empleado en las medidas de SRM:

Bucle en ocho de 75 m de lado → matriz 75 jiloca mrm.

Bucle en ocho de 50 m de lado → matriz 50 jiloca mrm.

Bucle cuadrado de 100 m de lado → matriz 100 jiloca mrm.

En todos los casos se ha tomado 55°N para la inclinación del campo magnético y una frecuencia de resonancia de 1905 Hz.

8.4 Interpretación

A partir de los datos de campo, y con las pautas indicadas en el capítulo 3 de este Informe, se ha realizado la inversión de las mediciones. Para cada SRM se han efectuado varias pruebas de proceso, hasta encontrar el mejor ajuste. En la tabla siguiente se resumen los parámetros de proceso finalmente adoptados, con indicación en algún caso de otros utilizados y cuyos resultados también se incluyen.

proceso de datos de SRM zona de JILOCA						
SRM	r.a.f. time conts. Ms	S/N	error ajuste %	p.regularización.	Cpx	observaciones
sgop	25	2,38	4,7	822	2,54E-06	
sgop	25	2,09	4,4	680	2,54E-06	sin q=16,14 adop.
Te15	25	0,8	19,8	2075	8,67E-07	
Te15	25	0,66	9,6	2929	8,67E-07	sin q=4,6,8,9,10,11 adop.
Te34	25	0,8	11,3	1102	5,94E-08	
Te34	25	0,74	6,5	490	5,94E-08	sin q=12 adop.
Te11	15	0,67	13,8	808	2,54E-06	Notch wide
Vi2	25	1,1	8,2	438	5,94E-08	
Te19	15	0,67	17,6	915	8,67E-07	Notch wide
Te45	15	2,3	6,2	976	5,94E-08	
Te44	15	1,3	19,4	2693	5,94E-08	
Te44	25	1	9,6	640	5,94E-08	sin q=8 adop.
Tc36	15	3,25	5,5	124	5,90E-08	
Te42	15	1,18	10	732	5,94E-08	
Te26	25	7,93	1,3	122	5,10E-06	
Te27	25	3,23	3,1	162	5,94E-08	
Te27	25	3	2,4	147	5,94E-08	sin q=16 adop.

TablaProcesoJILOCA

En el **ANEXO III-D** se recogen los gráficos $E(t)$, $E_o(q)$, $Namb(q)$, $T_2^*(q)$, $f(q)$, $fase(q)$ y $w(z)$, comentados en el apartado 3.4. Los ficheros (*.nov) resultado del proceso de inversión se encuentran en el **ANEXO III-E**.

En este capítulo se muestran solamente los gráficos de distribución del contenido de agua $w(z)$, que suponen la interpretación de las mediciones. Los gráficos de distribución de la permeabilidad $k(z)$ y transmisividad acumulada $T(z)$ en función de la profundidad para los SRM en los que ha podido medirse el tiempo T_1 serán presentados en el apartado 8.5.4.

En lo que sigue, al referirnos a potencias de capas de la interpretación, debe tenerse en cuenta la distribución efectuada en el proceso de inversión, según fue explicado anteriormente y reflejado en la Figura 2.

Junto al resultado de cada SRM se ha dibujado la columna litológica suministrada, así como la información de la profundidad del acuífero conocido. Las litologías se han simplificado a 8 grupos, de acuerdo con el predominio de unos u otros materiales; la codificación en color pretende seguir una pauta parecida a la utilizada para las constantes de tiempo, aunque debe tenerse en cuenta las diferencias entre T_1 y T_2^* .

Para la descripción de los resultados se han agrupado los SRM según su situación geográfica:

Sondeos Te 26, Te 27 y SGOP1. (Figura 8a)

Estos tres sondeos se sitúan en la parte norte de la zona de estudio, entre las poblaciones de Caminreal y Calamocha, estando distanciados del orden de 1000 m entre ellos. La amplitud de la señal en estos tres SRM es superior a 100 nV, llegando a valores máximos de 450 nV, con un mantenimiento de las frecuencias y comportamiento de la fase que les otorga buena calidad y fiabilidad, en especial para el Te26, con valores de S/R entre 2 y 8. En la inversión se han obtenido resultados con ajustes mejores del 5%. En la Figura 8a se representan los resultados en cuanto a distribución de agua con la profundidad, así como de los valores de T_1 ó T_2^* en una escala de color, indicativa de la granulometría de cada capa (ver apartado 3.4: valores altos, en azul y verde son indicativos de tamaño grande de poros, mientras que a los colores rojos les corresponde el menor tamaño). En la misma figura se presentan las columnas litológicas e información disponible sobre la situación del acuífero en cada sondeo; a pesar de su gran proximidad geográfica, es apreciable la difícil correlación entre este grupo de sondeos.

El **SRM Te 26** es el que presenta mejor relación señal/ruido, 7.93. En él se midió con 2 convertidores por lo que se han obtenido valores de T_1 . El tramo con mayor contenido en agua se encuentra entre los 16 y los 22 m, con un valor máximo del 7 % y valores de constante de tiempo en el rango de las debidas a material de grano fino. Para el resto de las capas los valores son inferiores al 2 %. El sondeo mecánico más próximo es el 2619-7034, que hasta el metro 15 atraviesa calizas y travertinos y, posteriormente, tras 15 metros de margas, tiene una serie detrítica, fundamentalmente gravas, hasta el final del sondeo (105 m). El acuífero conocido está en estas gravas entre los metros 80-85, fuera del alcance de este SRM. Sin embargo, la entubación está ranurada entre los metros 50-58 (¿) y 82-90. La solución encontrada para la distribución de agua en la inversión del

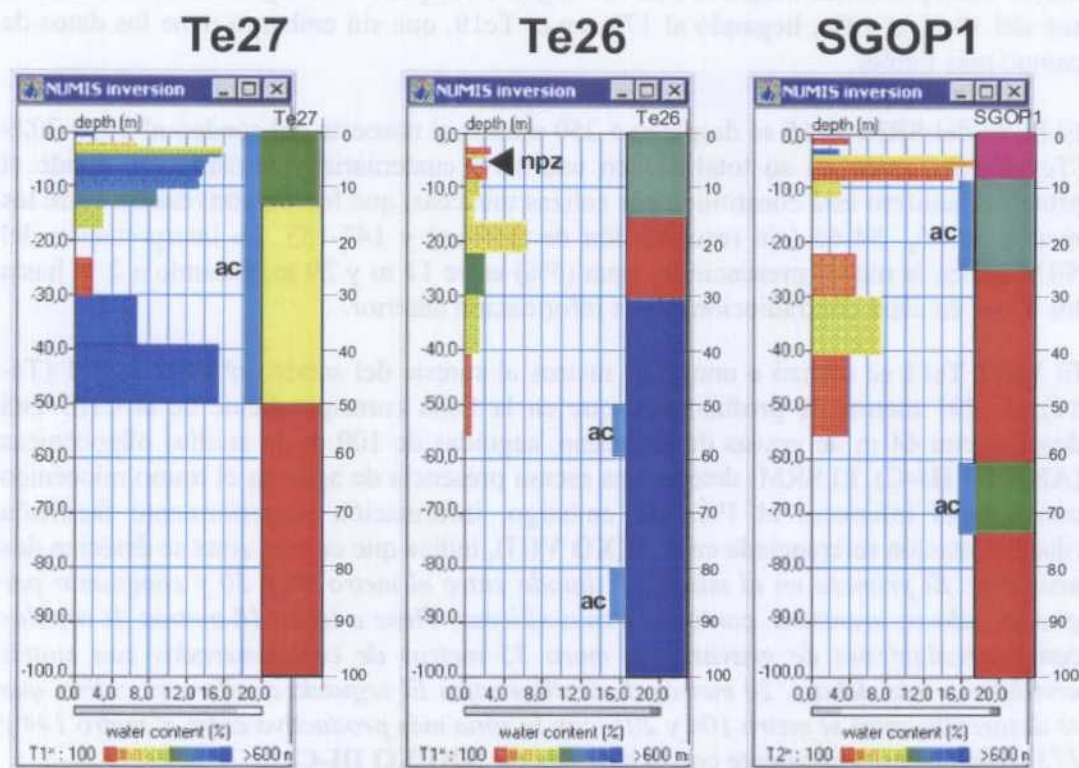
SRM es incompatible con esta información hidrogeológica, sobre todo el mayor contenido en agua en un paquete de arcillas.

El **SRM SGOP 1** es más ruidoso que el anterior; no fue posible hacer medidas con dos pulsos, obteniéndose solo los valores de T_2^* . Los sondeos de referencia más próximos son los nº 2619-7047 (sgop S-1 bis) y 2619-7048 (sgop S-1), ambos de reconocimiento, distantes entre sí escasos metros y de 170 y 130 metros de profundidad respectivamente. Se atraviesa una serie cuaternaria hasta el metro 61 y miocena hasta el final. Destaca la existencia de tobas y travertinos bajo 8 metros de arcillas, arenas y gravas y por encima de 22 metros de arcillas y turba. Posteriormente, dentro de un potente paquete de arcillas, entre los metros 61 y 74 se atraviesan calizas de páramos y, entre los metros 144 y 169, conglomerados y arenas. No hay referencia al comportamiento acuífero de estos materiales, si bien se presupone que el mayor interés reside en las tobas y travertinos. Se considera acuífero el tramo de tobas entre 8-24 m y en calizas entre los 61-74 m. En la solución del SRM se observa un nivel acuífero entre los 4 m y los 9 m, con un contenido en agua superior al 15%, y que se corresponde con la capa de arcilla-arenas-gravas detectada en el sondeo mecánico. Se deduce también la existencia de un nivel más profundo, sobre todo entre los 30 m y los 40 m, con un 7% de contenido en agua, aunque estos valores son debidos posiblemente al ruido existente en la curva $E_0(q)$ (figura en **ANEXO III-D**); se puede encontrar una solución anulando el agua en dicho tramo, aunque para ello hay que aumentar la porosidad hasta el 50% en el tramo calizo, lo que tampoco es realista. Por lo tanto, el supuesto mejor comportamiento acuífero de las tobas y travertinos entre los 8 y los 24 metros, no se ve confirmado por los resultados del SRM. Según los valores de T_2^* todos los materiales atravesados por este SRM se corresponden con litologías de grano fino o muy fino. Al ser el SGOP1 un sondeo testiguero, la falta de correspondencia con el SRM puede ser debida tanto a un problema de deficiente registro geológico e hidrogeológico del sondeo como a un problema de mal ajuste del método, debido al ruido.

En el **SRM Te27**, el sondeo mecánico indica que tras un metro inicial de arcillas, se localiza el acuífero en calizas desde 1 m a 14 m y en gravas con margas del Plioceno desde los 14 a los 50 m, siendo margas desde esa profundidad hasta los 105 m. La interpretación efectuada para el SRM muestra, aparte de un primer contenido en agua muy superficial, un nivel acuífero de litología variada entre los 2 y los 14 m, con porosidad de 9-16%. El tramo final en ascenso de la curva $E_0(q)$ (figura en **ANEXO III-D**) aunque ruidoso, parece indicar la existencia de un segundo nivel acuífero a partir de los 31 m, del que no puede definirse su muro, con contenidos en agua que superan el 16%. Los valores de T_1 son en este SRM superiores a los SRM anteriores, lo que indica que los materiales son de tamaño de grano más grueso, y posiblemente más permeables. La correspondencia entre el resultado del SRM y el acuífero conocido entre superficie y los 50 m es buena, aunque el contenido en margas, según el SRM, debe ser mayor entre los metros 15 y 31, tramo que actúa como un acuitardo.

Para este conjunto de SRM, se aprecia, por tanto, que a pesar de que las distancias entre medidas es tan sólo de unos 1000 m, se presentan variaciones importantes tanto entre los datos ya conocidos como entre los resultados obtenidos para cada sondeo, lo que es una indicación de gran heterogeneidad en este acuífero. Existen además discrepancias entre los datos conocidos y los resultados. Se detecta un acuífero superficial que contiene agua en el SGOP1 y en el Te27, pero apenas en el Te26. Existe un segundo acuífero más profundo, que contiene mayor cantidad de agua en el Te27; si realmente

existe también en el Te26, es posible que el SRM no lo haya detectado ya que sólo pudieron medirse 14 momentos de emisión. El segundo grupo de capas con agua detectado en el Te26 y SGOP1 es, en principio, poco reconciliable con la litología de arcillas en esas profundidades.



Resultado de la inversión de los SRM del Jiloca. Contenido en agua en función de la profundidad, junto con las columnas litológicas e indicación del acuífero (ac) en los sondeos más próximos. npz: nivel piezométrico medido

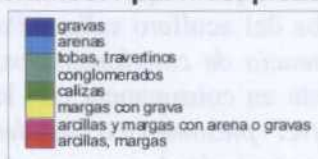


Figura 8 a. Interpretación de la distribución del contenido en agua y de T_1 de los SRM Te27, Te26 y SGOP1, con indicación de las columnas litológicas, acuíferos y nivel piezométrico previamente disponibles. Para interpretación de los tiempos tener en cuenta que $T_1 = 1.5 T_2^*$. Los colores adjudicados a la litología se han elegido en correspondencia con el valor de la constante de tiempo, según se indica en el párrafo 3.4.

SRM Te15, Te34, Te19 y Te11 (Figura 8b)

Situados unos 5 km al Sur de los anteriores, y con mayores distancias entre ellos, este grupo de SRM presenta curvas $E_a(q)$ muy irregulares, con amplitud de señal inferior a 50 nV y máximos de 100 nV, excepto en el Te34, donde es mayor, pero errática (figuras en ANEXO III-D), lo que da lugar, a pesar de que el nivel de ruido es similar al del norte (Figura 7) a que la relación S/R sea inferior a 1. Las fuertes oscilaciones de la frecuencia y de la fase, junto con el espectro de frecuencias de las curvas $E(t)$, son un

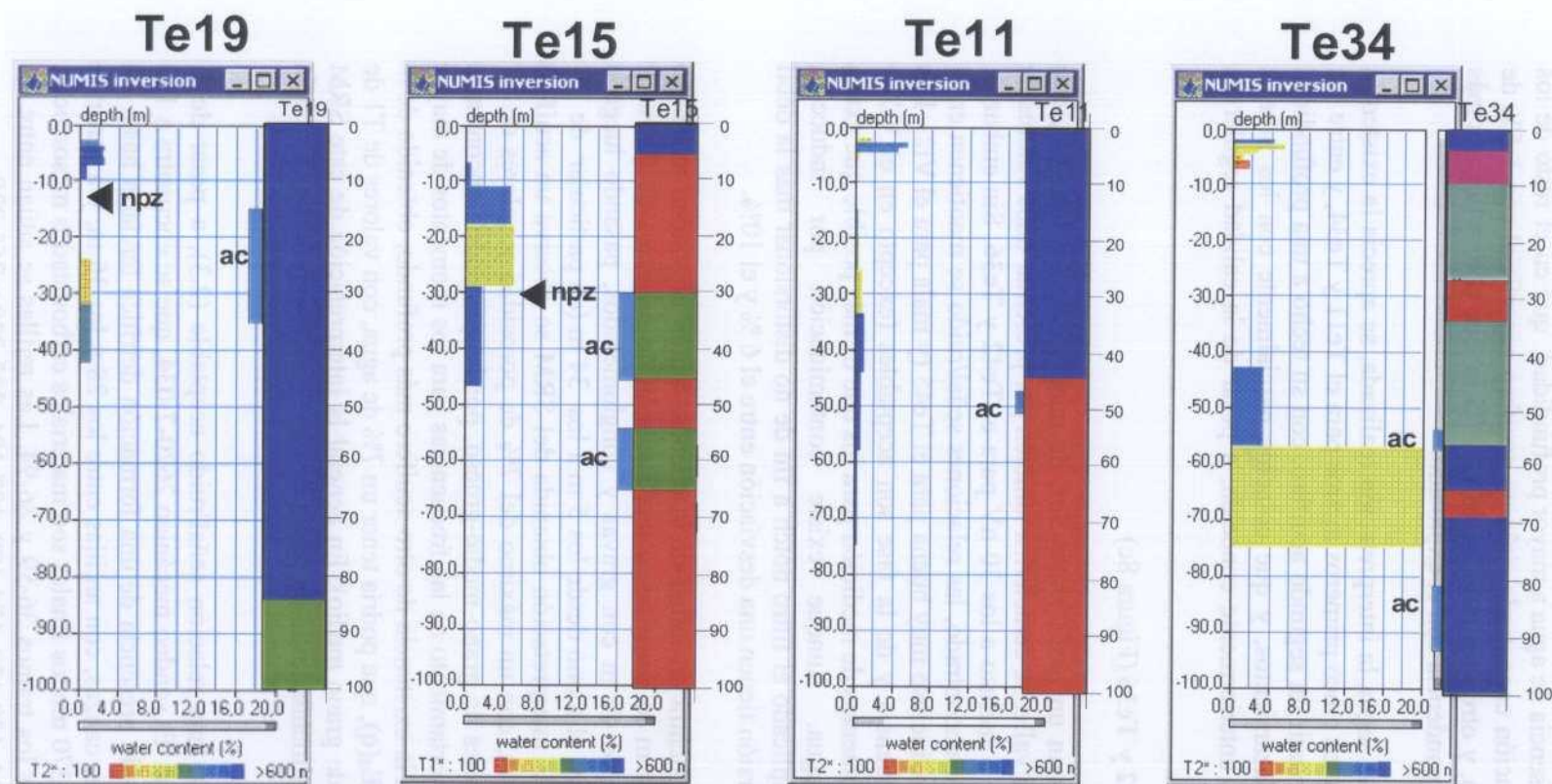
indicio más de que los valores tan bajos de señal medida son motivados por una escasa presencia de agua dentro de la profundidad de investigación de estos SRM. La variación de la frecuencia $f(q)$ en el Te15 hace pensar en la existencia de niveles muy conductores (lo que coincide con su columna litológica, con mayor presencia de arcillas) y/o de mayor susceptibilidad magnética en ese lugar. Los ajustes conseguidos en la inversión son del 10 % al 14%, llegando al 17% en el Te19, que sin embargo tiene los datos de campo más fiables.

El bucle del **SRM Te15** se desplegó a 250 metros al noroeste del sondeo nº 2619-7029 (Te-15), perforado en su totalidad en una serie cuaternaria y terciaria, en donde el principal acuífero está constituido por calizas tobáceas, que fueron atravesadas entre los metros 30-45, 54-65 (sin recuperación de detritus) y 142-153. La interpretación del SRM indica la mayor presencia de agua (5%) entre 11 m y 29 m, pasando a 2 % hasta los 47 m, en clara contradicción con la información anterior.

El **SRM Te11** se realizó a unos 130 metros al sureste del sondeo nº 2620-30011 (Te-11), de 201 metros de profundidad, que en la ficha correspondiente de la CHE está descrito con 44 m de gravas del Mioceno, seguidas de 100 m de arcillas oligocénicas (**ANEXO III-C**). El SRM detecta una escasa presencia de agua en el tramo miocénico con valores inferiores al 1%. Sin embargo, información posteriormente facilitada (documentación referenciada en **ANEXO VIII**), indica que en esta zona se detectan dos acuíferos: *El primero en el mioceno, situado entre el metro 46 y 50 y compuesto por gravas calizas, areniscas, cantos y arenas silíceas. Tiene a techo 16 metros de arcillas con intercalaciones de gravas, y a muro 35 metros de conglomerados con matriz arcillosa y, más debajo, 20 metros de arcillas rojas* El segundo acuífero es calizo, que se desarrolla entre el metro 104 y 201, con la zona más productiva entre el metro 144 y 173 (columna no coincidente con la indicada en **ANEXO III-C**).

De acuerdo con lo descrito en los primeros informes del IGME, el acabado del sondeo desestimó el acuífero mioceno, por lo que los parámetros hidráulicos detectados en este sondeo serían sólo representativos del acuífero calizo. *Por otra parte, un registro de Gamma Natural sugiere la existencia de conglomerados, entre el metro 38 y 52 de profundidad* (información que está en consonancia con los resultados del SRM), *que según las fluctuaciones del nivel piezométrico pueden ocasionalmente no estar saturados; hasta los 102 metros se trataría de una zona fundamentalmente arcillosa, y a partir de aquí se desarrolla el acuífero calizo, compuesto por calizas y calcarenitas, (testificación visual realizada en 1990 mediante televisión pone de manifiesto la existencia de tubería ranurada, al menos, entre 98 a 108 m, de 119 a 133 m, de 154 a 161 m y a 172 m, con abundante entrada de agua en esta última zona).* En cualquier caso, el principal acuífero aquí existente está fuera del alcance de la profundidad de investigación de los SRM.

El sondeo **SRM Te19** se efectuó inmediatamente al norte del sondeo nº 2620-2011 (Te-19), que capta un primer acuífero detrítico, en gravas, entre los metros 14 y 36, intercalado en 85 metros de relleno del valle, y un segundo en calizas mesozoicas con zona productiva entre los metros 134 y 147. La bibliografía indica que el sondeo sólo se encuentra ranurado entre los metros 14 y 36 (no obstante, este dato tiene que ser tomado con reservas). La interpretación de este SRM, con una relación S/N de 0.6, es dudosa, indicando la presencia de una pequeña cantidad de agua entre los 3 m y los 10 m (con el 2.5%) y entre 24 m y 42 m (1%), en cierta correspondencia con la información previa.



Resultado de la inversión de los SRM del Jiloca. Contenido en agua en función de la profundidad, junto con las columnas litológicas e indicación del acuífero (ac) en los sondeos más próximos. npz: nivel piezométrico medido

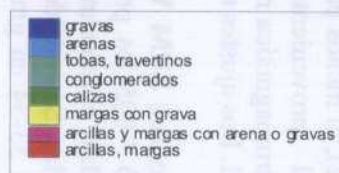


Figura 8 b Interpretación de la distribución del contenido en agua y de T_1 de los SRM Te19, Te15, Te11y Te34, con indicación de las columnas litológicas, acuíferos y nivel piezométrico previamente disponibles. Para interpretación de los tiempos hay que tener en cuenta que $T_1 = 1.5 T_2^*$ (ver apartado 3.4). Los colores adjudicados a la litología se han elegido en correspondencia con el valor de la constante de tiempo, según se indica en el párrafo 3.4.

El **SRM Te34**, está realizado próximo al sondeo mecánico 2620-30-31, donde se conoce la existencia de un nivel acuífero entre los metros 53 a 55, 80 a 92 y 113 a 164. La curva $E_0(q)$ es claramente ascendente, llegando a sobrepasar los 350 nV, lo que, a pesar del ruido, indica la presencia de agua a mayor profundidad que en el resto de los SRM de este grupo. La solución encontrada sitúa un acuífero superficial con 1-5% de agua entre los 2 m y los 7 m, y otro profundo, entre 43 y 75 m, que podría llegar a más del 20 %, y con cierta correspondencia con el explotado.

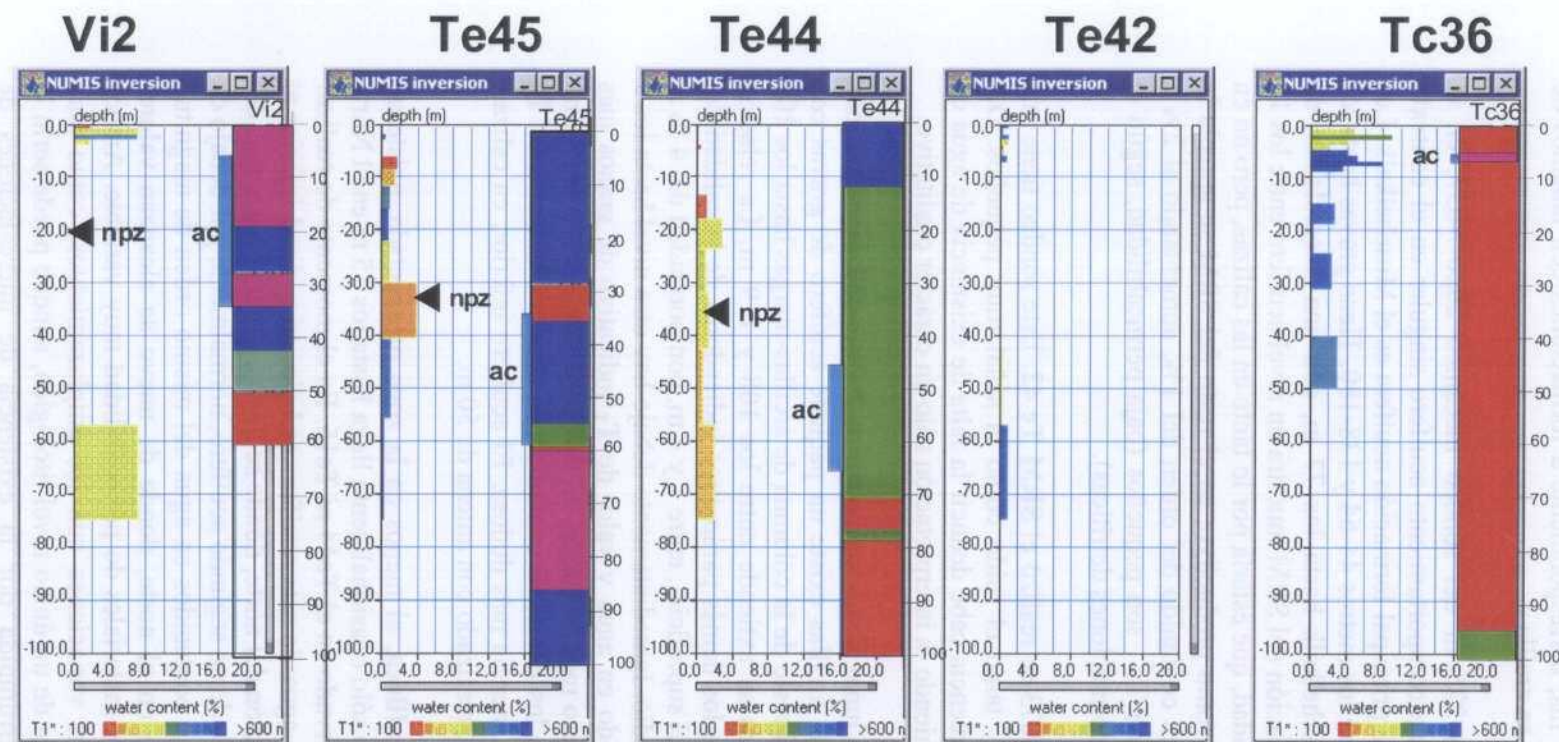
Para el conjunto de esta zona, según la interpretación realizada, se aprecia la existencia de un acuífero superficial en los cinco primeros metros para el Te11 y Te34, y entre 5 y 10 m para el Te19. Podría existir un segundo acuífero, con su techo a una profundidad muy variable con los emplazamientos, y que coincide parcialmente con los niveles descritos en la información anteriormente conocida, a pesar de la calidad regular de estos SRM.

SRM Vi2, Te45, Te44, Te42 y Tc36 (Figura 8c)

Este conjunto de SRM forman un perfil Norte-Sur, de unos 15 km de longitud, que cubren la porción central del valle; se caracteriza también por presentar unos valores de señal inferiores a los 50 nV e incluso a los 30 nV para el Te42 y Tc36. Sin embargo, debido al poco ruido exterior encontrado, las relaciones señal/ruido se mantienen en el rango 1-3, con calidad buena, incluso muy buena para el Te45 (y mala para el Vi2). Los comportamientos de la frecuencia y de la fase son aceptables (excepto en el Vi2 y Te42), al menos para los momentos de medición para los que es más posible que exista señal proveniente del agua. Aunque existe contaminación por inducción electromagnética no se ha aplicado el filtro notch a fin de no distorsionar más la débil señal. Los ajustes de la inversión tienen una desviación entre el 6 % y el 10%.

El sondeo **SRM Vi2** se encuentra en mitad de la cuenca. Según el sondeo mecánico 2620-7-005 los primeros 34 m lo constituyen una sucesión de paquetes de gravas y arcillas, continuando hasta los 49 m con gravas y conglomerados, pasando luego a arcillas. Se considera acuífero el tramo desde los 5 m a los 34 m (en particular de 17-18 y 33-34 en gravas). En la interpretación obtenida del SRM se observa un acuífero superficial desde 0 hasta 3 m, con un máximo del 7% de porosidad y valores de T1 correspondientes a formaciones de grano medio-grueso, por lo que podría encontrarse en las gravas. Dado el comportamiento de las frecuencias para los momentos de mayor penetración, es poco segura la existencia de otro acuífero más profundo, obtenido de la tendencia final de la curva $E_0(q)$, que podría tener un 7% de agua, con valores de T1 de 300 ms (litología de arena de grano medio). En general la interpretación de este SRM debe de tomarse fundamentalmente desde un punto de vista cualitativo debido a su baja relación señal/ ruido.

El sondeo **SRM Te45** tiene una relación señal/ruido aceptable (2.3), a pesar de la debilidad de la señal máxima. El sondeo mecánico 2620-7-034, que se encuentra a 180 m al este del SRM, muestra la presencia de una formación detrítica terciaria hasta los 132 m, compuesta de gravas, calizas, con arcillas entre los 28 y los 36 m, y a partir de los 59 m; el resto, hasta los 370 metros finales son materiales carbonatados mesozóicos. Se considera acuífero entre los tramos 36-59 y 86-94. Las rejillas se sitúan entre los metros 34-37, 52-56, 110-114, 130-132, 174-179, 187-191, 222-228 y 265-238.



Resultado de la inversión de los SRM del Jiloca. Contenido en agua en función de la profundidad, junto con las columnas litológicas e indicación del acuífero (ac) en los sondeos más próximos. npz: nivel piezométrico medido

Figura 8 c Interpretación de la distribución del contenido en agua y de T_1 de los SRM Vi2, Te45, Te 44, Te42 y Te36, con indicación de las columnas litológicas, acuíferos y nivel piezométrico previamente disponible. Para interpretación de los tiempos tener en cuenta que $T_1 = 1.5 T_2^*$. Los colores adjudicados a la litología se han elegido en correspondencia con el valor de la constante de tiempo, según se indica en el párrafo 3.4.

La interpretación del SRM Te45 indica que hasta los 30 m existe un acuífero de litología variable, con un contenido muy bajo en agua (0.6-1%). Entre los metros 30 a 40 pasa al 4%, siendo este nivel paradójicamente donde se sitúan las arcillas (y la rejilla!), con valor de T_1^* de 150 ms, correspondiente a formaciones con tamaños de grano fino, pero de bajo contenido en arcilla.

El **SRM Te44**, está realizado a 225 m del sondeo mecánico 2620-7-037, en el denominado “Domo de Singra”, de comportamiento acuífero singular en el contexto hidrogeológico del Jiloca, ya que la principal formación acuífera es el Muschelkalk. Los niveles productivos se situaron entre los metros 44-64 y 138-180. Tiene gravas hasta los 12 m, pasando a calizas del Muschelkalk hasta los 77 m, con una intercalación de arcillas entre 71-75 m. La interpretación del SRM muestra un nivel acuífero entre los 18 m y los 24 m, con un 3% de porosidad, que estaría por lo tanto en las calizas, pero no en el tramo anteriormente declarado como productivo; en el resto del SRM se aprecia la existencia continua de agua con un contenido del orden del 1%, aumentando al 2% a partir de los 57 m . Los valores de T_1^* son pequeños (baja permeabilidad, según el orden de magnitud manejado para formaciones detríticas).

Junto al sondeo mecánico 2621-3-073 se realizó el **SRM Te 42**. Este sondeo tiene una relación señal/ruido de 1, siendo tanto el ruido como la señal muy pequeños. Del comportamiento errático de la frecuencia cabe deducir la falta de existencia de agua en este entorno (inferior al 0.5 %), teniendo la interpretación sólo un carácter cualitativo.

El **SRM Te4 (Tc36)**, fue realizado junto al sondeo mecánico 2621-3-037, cuya columna litológica muestra que tras 5 m de arcillas existe un paquete acuífero de gravas con arcillas entre los 5 y 6 m, siendo el resto de la columna de arcillas-margas hasta los 101 m; un segundo acuífero en calizas se extiende entre los 108 y 119 m. La relación señal/ruido es buena (3), así como los demás parámetros indicadores de la calidad del registro. Se observa un primer nivel superficial, entre 1 y 4 m, con porosidad del 4 % al 9% y valores de T_1 grano fino-medio. Inmediatamente debajo hay otro nivel hasta los 9 m, alcanzando el 8 % de contenido en agua y valor de T_1 indicativo de granos más gruesos. La existencia de un acuífero más profundo, en diversos tramos hasta los 30 m, es muy fiable según la calidad de los datos; su contenido en agua alcanza el 2 %. El acuífero entre 40 y 50 m es de existencia más dudosa. El acuífero inferior, en calizas, está fuera del alcance de este SRM, realizado con antena de 50 m.

En conjunto, en el valle del río Jiloca, al menos en la zona prospectada, existe un acuífero en los primeros 10 m, que sólo ocasionalmente llega hasta los 15 m en el Norte (Te27 y SGOP1) y que no es observado en el Te44 ni Te15. En el momento de realizar estas mediciones, el contenido en agua de este acuífero es bajo, en general inferior al 6%, excepto en la mencionada sección del norte, donde se llegó a calcular hasta más del 15%. Es muy probable la existencia de un segundo acuífero, normalmente por debajo de los 25 m de profundidad, con unos contenidos en agua del mismo orden de magnitud que el acuífero superior (excepto en el norte, donde de nuevo se alcanzan valores superiores al 15%), y formado por materiales de permeabilidad muy variable. Ambos acuíferos presentan las suficientes variaciones con los emplazamientos, como para poner de manifiesto que no se trata de un único nivel litológico, aunque pueda serlo la capa freática, en ocasiones interrumpida por la existencia de intercalaciones de acuitardos.

8.5 Determinación de parámetros hidrodinámicos

8.5.1 Datos de partida

En el siguiente cuadro se sintetiza la información previa suministrada para este Proyecto por la CHE y el grupo de hidrogeología del IGME sobre parámetros hidrodinámicos de los sondeos próximos a los emplazamientos de las mediciones:

zona	srn	nºinventario	Toponimia	X	Y	z	Prof	caudal l/s	Transmi.m2/dia	nivelpz
jiloca	Te15	2619-7-0029	EL GANCHO, TE-15, IRYDA	643560	4523159	954	210	148-310 310	5977-6449 20000	30,5
jiloca	Te26	2619-7-0034	IRYDA, TE-26	643133	4526427	924	145	2	[7082] 28000	3,8
jiloca	Te27	2619-7-0037	IRYDA Te-27	642188	4527455	910	125	50	7,32 1700	
jiloca	sgop1	2619-7-0047	EL MANGAR SGOP S-1bis	642338	4526210	910	170		25000	
jiloca	Te19	2620-2-0011	IRYDA TE-19	636963	4521447	954	230	50-238 170	3600-5400	12
jiloca	Te11	2620-3-0011	IRYDA TE-11	643820	4520063	960	201	175- 315 320	5977-6449 1200-9000 16000-18000	39,3
jiloca	Te34	2620-3-0031	IRYDA TE-34	643900	4518800	980	220	250 220 224	984-5000 2100	46
jiloca	Vi2	2620-7-0005	EL IMAR Vi-2	640203	4510307	959	106	102		20
jiloca	Te45	2620-7-0034	LOS LLANOS TE-45	641436	4506413	963	385	18-47	594 590	32
jiloca	Te44	2620-7-0037	LOS CAMPILLOS (PEGASOS). TE-44	641848	4503627	967	188	78-100	594 180	38,4
jiloca	To4 (Tc36)	2621-3-0037	IRYDA To-4	643588	4496593	975	130			
jiloca	Te42	2621-3-0073	DGA. TE-42	639731	4501155	980	356			

en azul datos nuevos de dic.03, [] dato dic.04 (A.Azcón); en rojo otros valores de CHE

Tabla srnhidrauJILoca

Los datos se han ido suministrando en diferentes momentos de la realización de este Informe, y, como puede apreciarse, aparecen variaciones importantes en algunos sondeos. Los valores utilizados han sido los últimamente facilitados.

A partir de las mediciones de SRM es posible determinar la permeabilidad, y por lo tanto la transmisividad, para lo que se precisa, según se especificó en el capítulo 3.2, del establecimiento de un coeficiente de calibración.

8.5.2 Procedimiento de cálculo del coeficiente de calibración

En cada SRM en donde se dispone de determinaciones de transmisividad procedente de ensayos de bombeo T_{eb} en un sondeo próximo, se ha procedido al cálculo del coeficiente C_p según la ecuación explicada en el capítulo 3.2:

$$C_p = T_{eb} / \sum w^a T^b \Delta z = T_{eb} / F_i$$

Los valores de w , T y z se han tomado para cada SRM del fichero *.nov resultado de la inversión (en ANEXOIII-E para el Jiloca y el correspondiente para cada zona), en el intervalo de acuífero definido en cada caso (se hace notar que se desconoce el intervalo real para el que están calculados los valores suministrados de T_{eb}). Para w (contenido en agua o porosidad) se ha empleado el valor extrapolado, expresado en tanto por uno. Como valor de T (constante de tiempo) se ha tomado el de T_1 en ms (excepto en unos

pocos SRM donde sólo se dispone de T_2^*). Las potencias Δz se han expresado en m. Como exponentes se ha utilizado $a=1$ y $b=2$ (según los mejores resultados obtenidos por Legchenko et al.2002. "Nuclear magnetic resonance as a geophysical tool for hydrogeologists", Journal of Applied Geophysics 50, 21-46). El valor de T_{eb} debe estar expresado en m^2/s .

En las hojas de cálculo recogidas en el **ANEXO III-F** para el Jiloca, y el correspondiente anexo para las demás zonas, se indican los tramos tomados para cada SRM, y el valor del coeficiente de calibración obtenido para cada sondeo.

Al disponerse de varios sondeos en una misma área, se ha tratado de encontrar un coeficiente único, realizando el cálculo final por la expresión

$$C_{pt} = \Sigma T_{eb} / \Sigma F_i$$

y con este C_{pt} se evalúa la transmisividad para cada SRM por

$$T_{srm} = C_{pt} F_i$$

ya que la finalidad de esta calibración es encontrar un valor del coeficiente que, evaluado en un lugar donde se dispone de información a través de ensayos de bombeo, permita calcular la transmisividad en otros emplazamientos donde sólo se dispone de mediciones de SRM. Es evidente que si las características hidrogeológicas del sondeo donde se efectúa la calibración y del SRM donde pretende aplicarse el coeficiente son muy diferentes, esta operación no dará resultados aceptables.

Para cada zona se ha confeccionado una tabla (tablas *interpreZONA*) que reúne los parámetros hidrodinámicos facilitados y los valores calculados a partir de las mediciones de SRM, con las columnas siguientes (variables con las zonas, según agrupación de sondeos):

Zona	srm	T_{eb} m ² /día	T_{eb} m ² /s	F_i	Intervalo z	$F_i \times C_{px}$	C_p	T_{srm} m ² /d
------	-----	---------------------------------	-------------------------------	-------	----------------	---------------------	-------	--------------------------------

siendo:

- **Zona:** Nombre de zona
- **Srm:** nombre del SRM
- **T_{eb} :** Transmisividad medida en el pozo (ensayo de bombeo) m²/día, o en m²/s
- **F_i :** Valor de "transmisividad" aparente determinado por los datos del SRM
- **z :** Intervalo de profundidades utilizado para el cálculo z, en m
- **$F_i \times C_{px}$:** Valor de la transmisividad T_{srm} para un sondeo (resultado de aplicar el coeficiente de calibración C_p), para el conjunto total (C_{pt}) o para un grupo (C_{px}), en m²/s
- **C_p :** Valor del coeficiente de cada sondeo (C_{pt} para la totalidad ó C_{px} para un grupo de sondeos.
- **T_{srm} :** Valor de transmisividad calculado en m²/día

cuya finalidad es el análisis y el trazado de los gráficos presentados los resultados.

8.5.3 Calibración para la zona del Jiloca

Siguiendo el procedimiento anteriormente explicado, se han obtenido los resultados recogidos en la siguiente tabla (los cálculos están recogidos en el ANEXO III-F):

zona	srn	Teb m ² /día	Teb m ² /s	Fi	Intervalo z	Fi x Cp2	Cp	Fi x Cp1	Fi x Cp2	Fi x Cp3	Fi x Cpx	Tsrm m ² /d
jiloca	Te26	28000	3,24E-01	62782	3-41	3,73E-03	5,16E-06				3,24E-01	28000,00
jiloca	sgop1	25000	2,89E-01	108790	1-12,22-56	6,46E-03	2,66E-06	2,76E-01			2,76E-01	23859,20
jiloca	Te11	17000	1,97E-01	82716	2-6,15-44	4,92E-03	2,38E-06	2,10E-01			2,10E-01	18140,80
jiloca	Te27	1700	1,97E-02	283491	2-18,30-50	1,88E-02	6,94E-08		1,88E-02		1,88E-02	1455,49
jiloca	Te34	2100	2,43E-02	480036	2-8,42-75	2,85E-02	5,06E-08		2,85E-02		2,85E-02	2464,59
jiloca	Te45	590	6,83E-03	79113	6-56	4,70E-03	8,63E-08		4,70E-03		4,70E-03	406,18
jiloca	Te44	180	2,08E-03	47475	18-75	2,82E-03	4,39E-08		2,82E-03		2,82E-03	243,74
jiloca	Te19	4500	5,21E-02	75064	3-7,24-43	4,46E-03	6,94E-07			6,51E-02	6,51E-02	5624,37
jiloca	Te15	20000	2,31E-01	251918	11-47	1,50E-02	9,19E-07			2,18E-01	2,18E-01	18875,63
jiloca	Vi2			135959	0-4,57-75	8,08E-03					8,08E-03	698,04
jiloca	To4 (Tc36)			259077	1-9,16-19,24-31,40-50	1,54E-02					1,54E-02	1330,14
jiloca	Te42											
		suma Teb	suma Fi			Cp						
		1,15E+00	1471385	Cpt		7,79E-07						
		4,86E-01	191506	Cp1		2,54E-06						
		5,29E-02	890115	Cp2		5,94E-08						
		2,84E-01	326982	Cp3		8,67E-07						

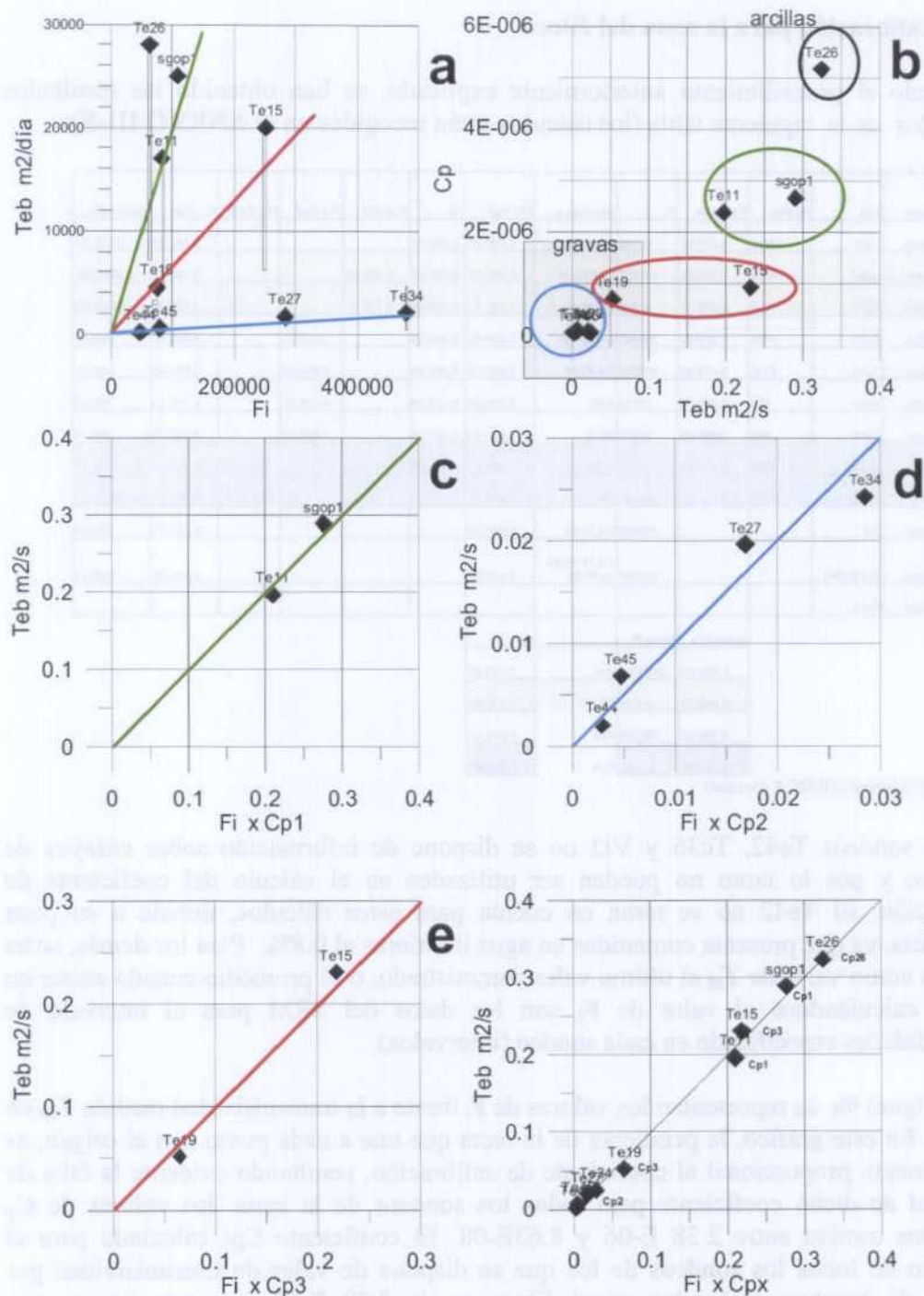
Tabla interpreJiloca (parcial)

De los sondeos Te42, Tc36 y Vi2 no se dispone de información sobre ensayos de bombeo, y por lo tanto no pueden ser utilizados en el cálculo del coeficiente de calibración. El Te42 no se toma en cuenta para estos cálculos, debido a su poca influencia, ya que presenta contenidos en agua inferiores al 0.8%. Para los demás, se ha tomado como valor de T_{eb} el último valor suministrado, o el promedio cuando existe un rango, calculándose el valor de F_i con los datos del SRM para el intervalo de profundidades especificado en cada sondeo (intervaloz).

En la Figura 9a se representan los valores de F_i frente a la transmisividad medida T_{eb} en m²/día. En este gráfico, la pendiente de la recta que une a cada punto con el origen, es directamente proporcional al coeficiente de calibración, resultando evidente la falta de unicidad de dicho coeficiente para todos los sondeos de la zona: los valores de C_p obtenidos oscilan entre 2.38 E-06 y 8.63E-08. El coeficiente Cpt calculado para el conjunto de todos los sondeos de los que se dispone de valor de transmisividad por ensayo de bombeo realizados en el Jiloca es de 7.79 E-07, que por las razones expuestas, no puede aceptarse como representativo de la zona en su conjunto.

En la Figura 9b se representan los valores de C_p frente a la transmisividad T_{eb} en m²/s, y puede apreciarse claramente, junto con el gráfico 9a, que existen al menos cuatro grupos de valores, recogidos por elipses en la figura:

- valores pequeños de C_p para el conjunto de SRM Te34, Te27, Te45 y Te44
- algo mayores para el Te19 y Te15
- superiores para el Te11 y SGOP1
- elevado para el Te26



Calibración de la transmisividad para los SRM del Jiloca
 $Cp_t=7.79E-07$ $Cp1=2.54 E-06$ $Cp2=5.94E-08$ $Cp3=8.67E-07$

Figura 9 Calibración de la transmisividad de los SRM de la zona del río Jiloca

Esta falta de agrupación puede responder a varios motivos:

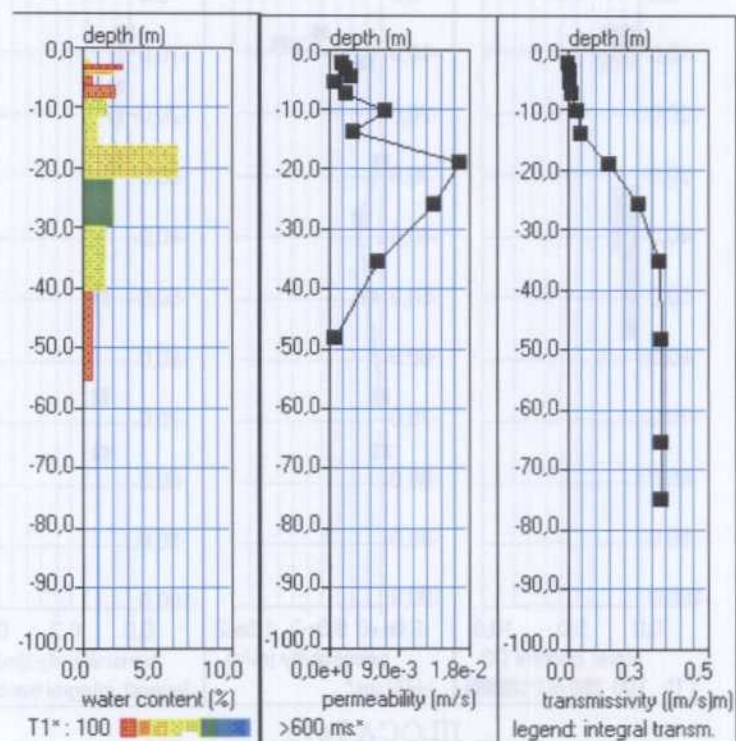
- A la calidad de las mediciones de SRM. En principio, la relación señal/ruido de los SRM Te11, Te19 y Te15 es muy pequeña (inferior a 0.7 para todos ellos), por lo que no deben considerarse sus resultados como fiables.
- A errores en el valor adjudicado a la transmisividad T_{eb} . En el gráfico 9a se indica para los sondeos Te26, Te11, Te15 y Te34 el rango de valores suministrados.
- A la falta de coincidencia entre los tramos acuíferos a que se refiere el ensayo de bombeo y los intervalos de agua detectados por el SRM
- En los sondeos SGOP1, Te19, Te11 y Te34 se ha utilizado el valor de T_2^* en el cálculo de F_i , lo que puede producir desviaciones respecto del resto, calculados con T_1 (con T_2^* los valores de F_i son inferiores a los determinados con T_1)
- A las diferencias de la litología del acuífero en los diversos emplazamientos. En este sentido, según se expresa en las Figuras 8, los resultados de los SRM (tramos donde los SRM han detectado la presencia de agua) pueden agruparse en los siguientes tipos fundamentales de litologías:
 - en tramos con mucha arcilla o margas: Te26, Te11 (con gravas), SGOP1 y Te15
 - en tramos fundamentalmente de gravas: Te34, Te27 (con calizas), Te45, Te44 y Te19

En el gráfico 9b queda reflejado cómo el primer grupo adopta los valores más altos y con amplio rango de variación de transmisividad T_{eb} (lo que resulta paradójico, ya que contradice el mayor contenido en arcillas), mientras que el segundo presenta valores muy inferiores y mejor agrupados. A pesar de que los valores de F_i no diferencian estas litologías (Figura 9a), los coeficientes de calibración si que permiten una clara diferenciación (Figura 9b), excepto para los sondeos Te19 y Te15, cuyos valores son dudosos por la relación señal/ruido.

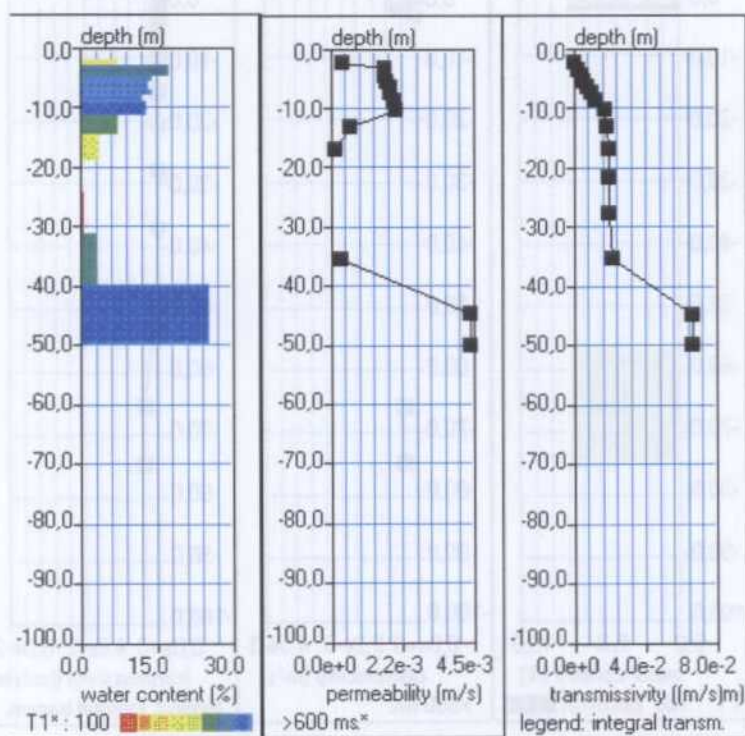
Según información obtenida posteriormente a las interpretaciones de los SRM, *los sondeos Te27, Te26, Te15 y SGOP-1, posiblemente deban su transmisividad a niveles pequeños o menores de tobas y travertinos, con los que están realacionadas las "arcillas". El sondeo Te11 capta sus aguas de un acuífero kárstico a profundidad superior a la investigada por los SRM, los sondeos Te15 y Te26 captan posiblemente en niveles delgados pero muy permeables, de calizas tobáceas.*

Por estas razones, se ha procedido al cálculo de coeficientes para cada tipo o familia detectada:

- la formada por los sondeos SGOP1 y Te11, para las que se ha obtenido un coeficiente $Cp1=2.54E-06$. La correlación entre los valores de transmisividad determinada por los SRM ($F_i \times Cp1$) y los medidos en los ensayos de bombeo, se representa en la Figura 9c. Los máximos valores de agua detectados en estos sondeos se corresponden con tramos fundamentalmente arcillosos. La información del Te11 de ensayos de bombeo, se refiere fundamentalmente al acuífero calizo, no detectado por el SRM.
- para los sondeos Te44, Te45, Te27 y Te34, se ajusta bien el coeficiente $Cp2=5.94E-08$ (Figura 9d). Excepto el Te44, que se encuentra en calizas, el resto ha encontrado los máximos valores de agua en tramos de gravas o arcillas-gravas.

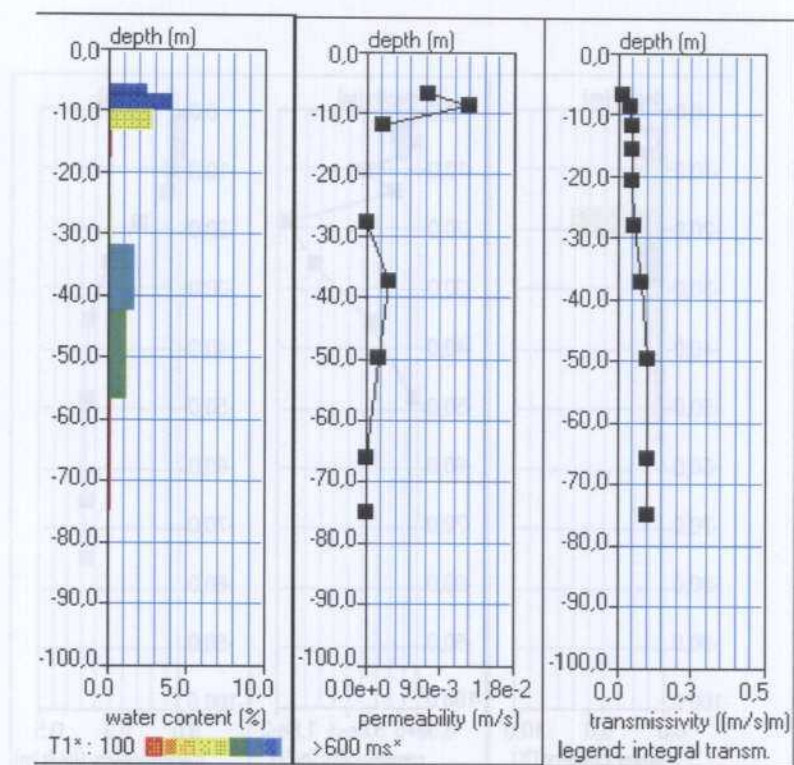


JILOCA TE 26

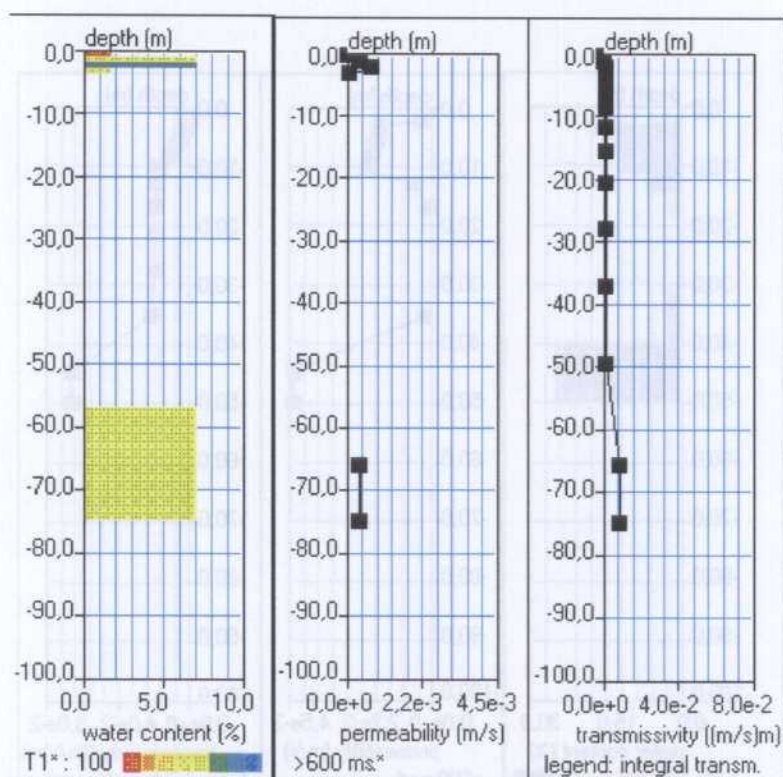


JILOCA TE27

Figura 10 a Distribución de la permeabilidad y de la transmisividad acumulada

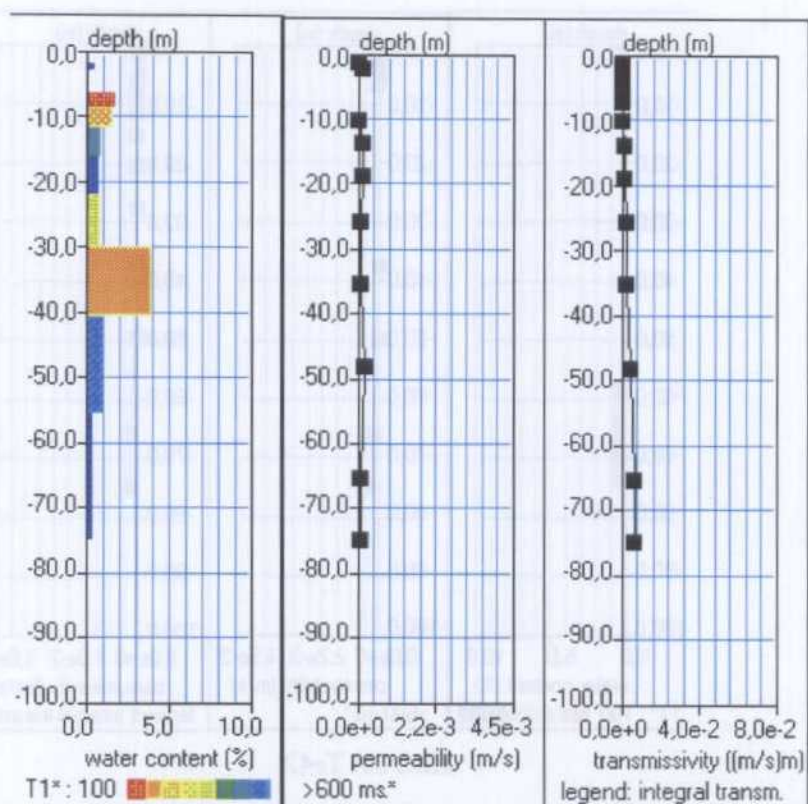


JILOCA Te15

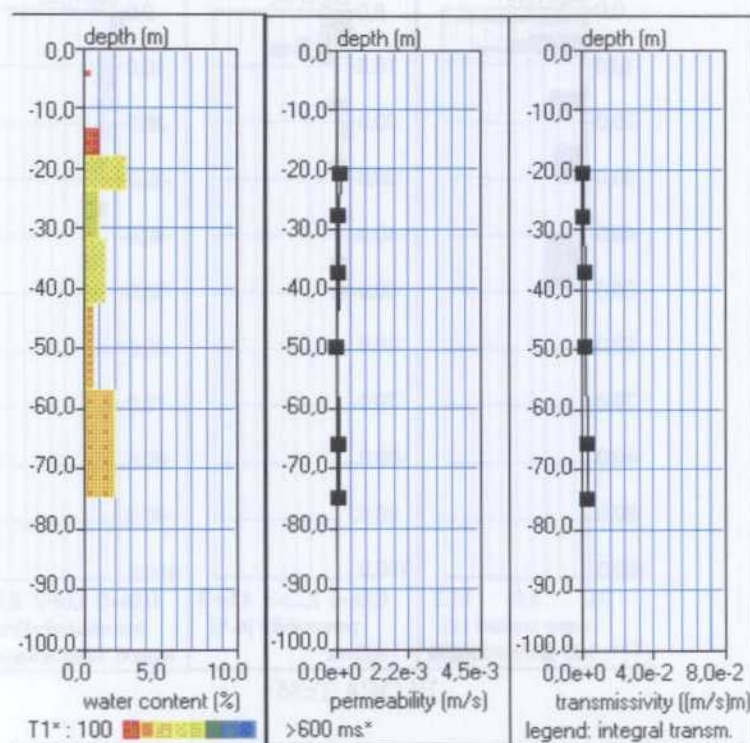


JILOCA Vi2

Figura 10 b Distribución de la permeabilidad y de la transmisividad acumulada

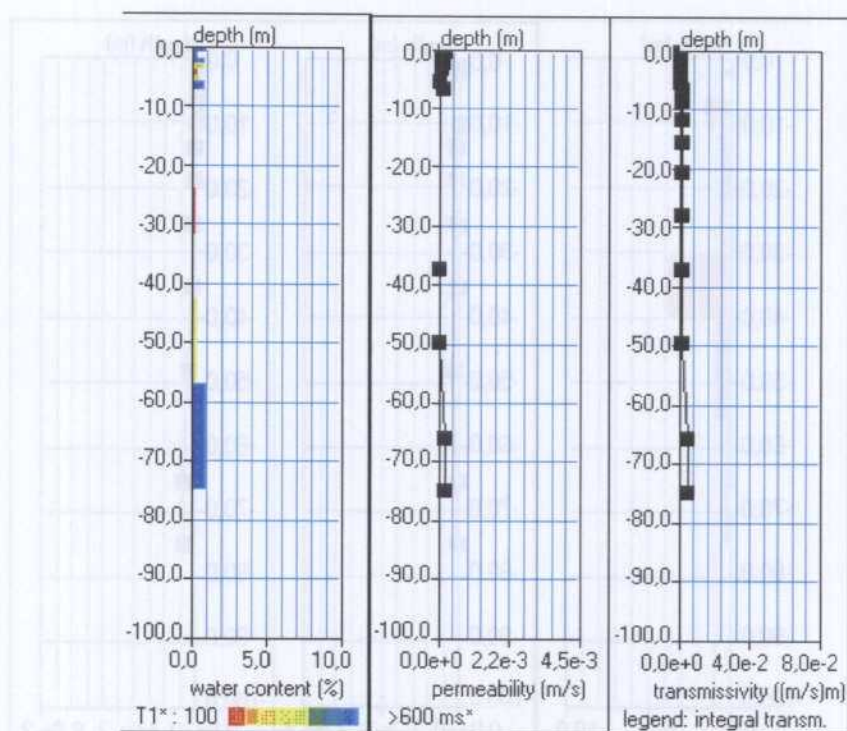


JILOCA Te45

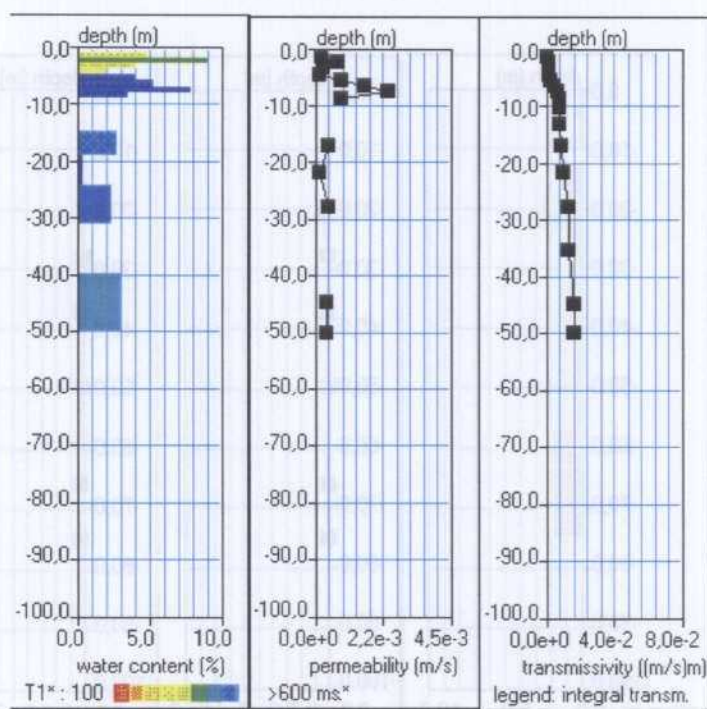


JILOCA TE44

Figura 10 c Distribución de la permeabilidad y de la transmisividad acumulada



JILOCA Te42



JILOCA Tc36

Figura 10 d Distribución de la permeabilidad y de la transmisividad acumulada

8.5.5 Otras relaciones entre parámetros hidrodinámicos y valores determinados por SRM

Se ha efectuado un análisis de la relación existente entre otros parámetros hidrodinámicos disponibles y valores determinados a partir de las mediciones de los SRM, buscando la posible relación que exista entre ambos, lo que permitiría utilizar las cantidades medidas o calculadas en los SRM para su evaluación. Así mismo, se ha buscado la posible relación entre valores determinados por los mismos SRM por su posible utilidad en un control de la calidad o fiabilidad de las mediciones y/o cálculos.

Para ello se cuenta con los siguientes valores:

zona	srn	npz	npz SRM	caudal l/s	caud med	Eomax	T2max	% max	permx	Tmax	S/N
jiloca	Te26	3,8	6	2	2	143	542	6,6	1,68E-02	0,109	7,93
jiloca	sgop1		4			476	520	16			2,09
jiloca	Te11	39,3	15	320	320	104	670	5,6			0,67
jiloca	Te27		2	50	50	318	700	16	0,004259	0,0458	3,01
jiloca	Te34	46	43	224	224	352	504	22			0,74
jiloca	Te45	32	30	18-47	33	68	216	4	0,000155	0,0023	2,3
jiloca	Te44	38,4	18	78-100	89	120	560	2,9	9,60E-05	0,0008	1,09
jiloca	Te19	12	24	50-238	144	99	730	2,7			0,67
jiloca	Te15	30,5	11	310	310	190	204	4,8	0,0105	0,087	0,66
jiloca	Vi2	20	57	102	102	104	460	7,2	0,00072	0,0069	1,14
jiloca	Te4 (Tc36)		4			86	650	9	0,00239	0,00349	3,25
jiloca	Te42					31	179	0,9	0,00168	0,00304	1,18

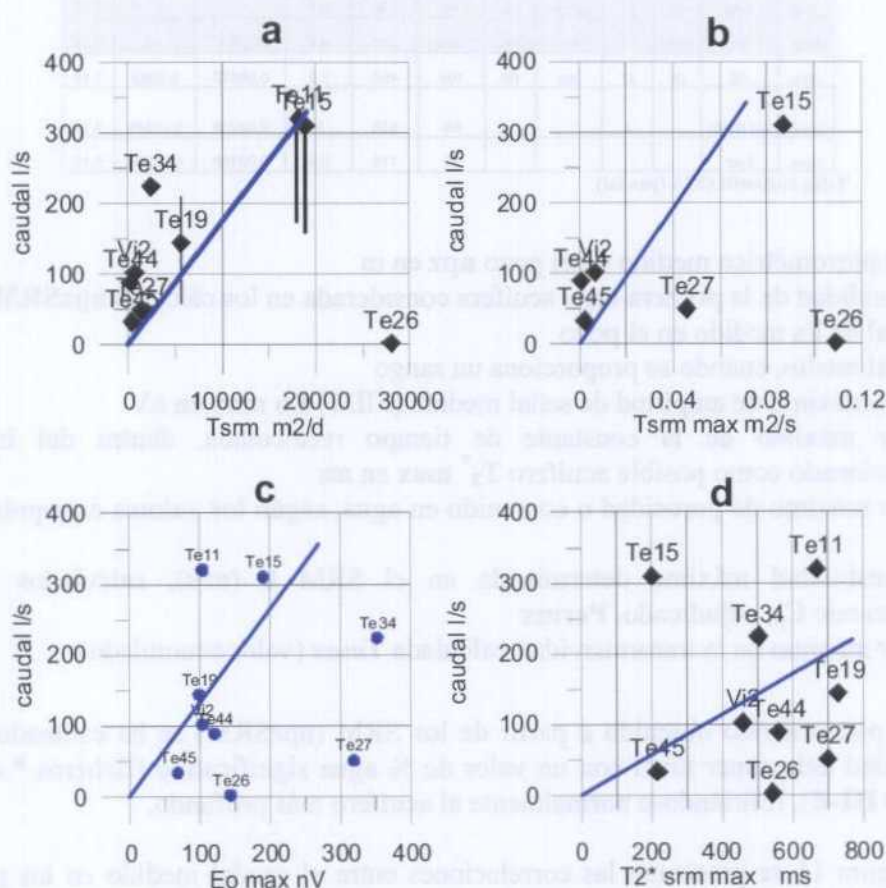
Tabla interpreJiloca (parcial)

- nivel piezométrico medido en el pozo **npz** en m
- profundidad de la primera capa acuífera considerada en los cálculos **npzSRM**
- caudal en l/s medido en el pozo
- caudal medio, cuando se proporciona un rango
- Valor máximo de amplitud de señal medida (FID1) **Eo max** en nV
- Valor máximo de la constante de tiempo recalculada, dentro del intervalo seleccionado como posible acuífero **T₂* max** en ms
- Valor máximo de porosidad o contenido en agua, según los valores extrapolados **% max**
- Permeabilidad máxima determinada en el SRM k (m/s), calculados con el coeficiente C_{px} adjudicado. **Perm_x**
- Valor máximo de la transmisividad calculada **Tmax** (valor acumulado)

El nivel piezométrico obtenido a partir de los SRM (npzSRM) se ha estimado por la profundidad del primer nivel con un valor de % agua significativo (ficheros *.nov del ANEXO III-E), refiriéndose normalmente al acuífero más profundo.

En la Figura 11 se presentan las correlaciones entre el caudal medido en los pozos y varios parámetros directamente medidos, o derivados, en los SRM (para el sondeo SRM Te26 el valor suministrado de 2 l/s debe de ser erróneo):

- Relación entre la transmisividad en m^2/d calculada a través de la calibración de los SRM, para todo el tramo considerado en cada sondeo, y el caudal medido en l/s (se representa el valor medio de los suministrados, con indicación del rango total, cuando este es elevado). Excepto para el sondeo Te34, se aprecia una correlación lineal, por lo que el valor calculado de T_{srm} podría ser usado como una primera evaluación de posibles caudales.
- Relación entre el valor máximo de transmisividad (pertenece por tanto sólo a una capa del tramo considerado, y cuando se dispone del tiempo T_1), y el caudal en l/s. La correlación es menos clara que con el parámetro anterior, sobre todo para el Te27.
- Relación entre el valor máximo de la señal E_o medida (en nV), y el caudal. Los SRM Te34 y Te27 se apartan de una buena correlación. Los Te11 y Te15 estarían mejor correlacionados adoptando los valores inferiores del rango dado para su caudal. E_o es por tanto un posible evaluador de caudales.
- Relación entre el caudal y el valor máximo en la inversión de la constante de tiempo T_2^* . A pesar de que la constante de tiempo tiene más relación con la permeabilidad que otros valores medidos, se aprecia una peor correlación con el caudal. Los sondeos Te15 y Te11 se adaptarían mejor a una tendencia creciente con los valores mínimos de su rango de caudal, y los Te27 y Te34 se apartan de ella.



Relaciones entre el caudal (determinado por mediciones en los pozos) y parámetros de SRM

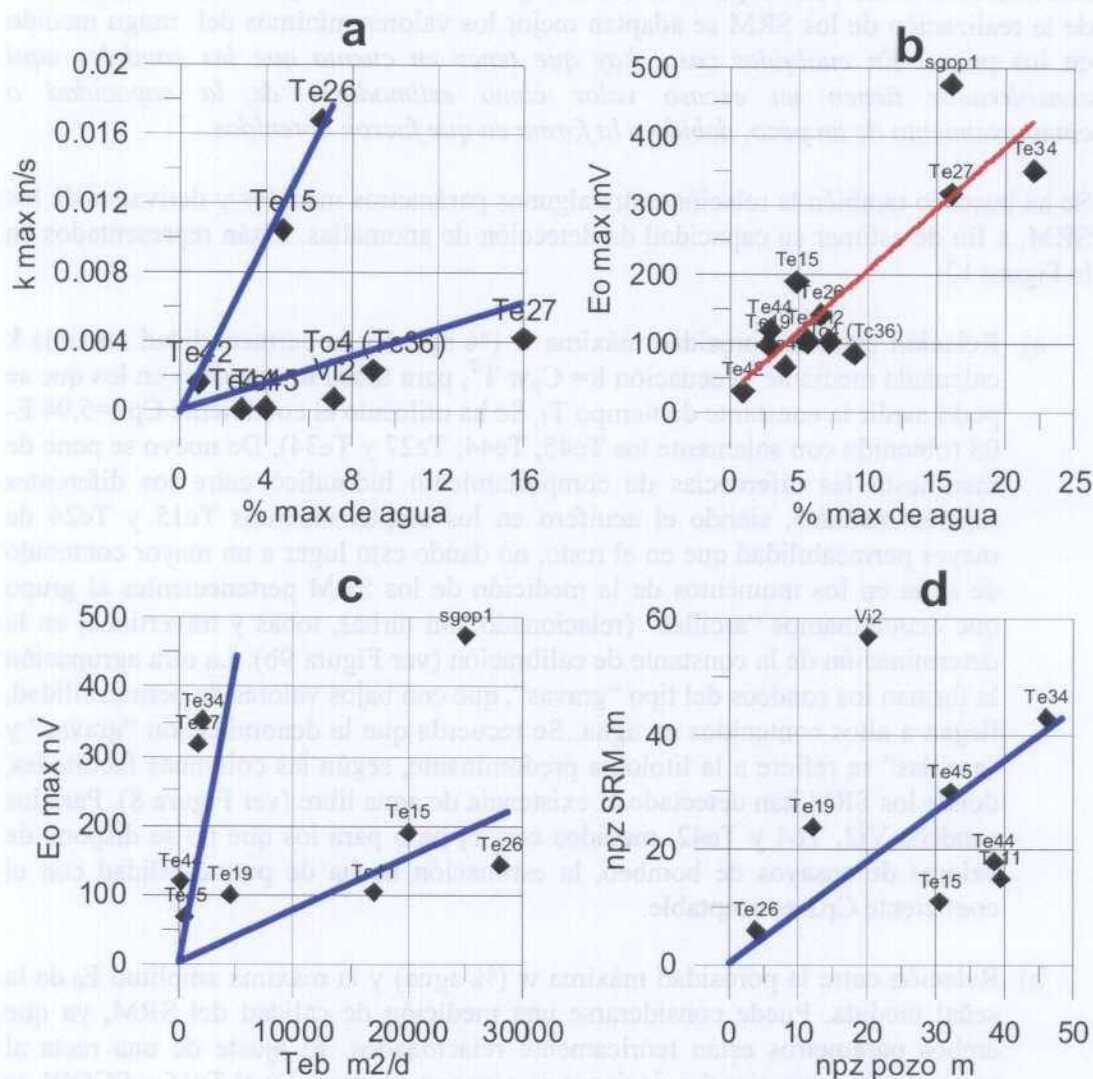
Figura 11. Relación entre el caudal y parámetros de los SRM en la zona del Jiloca

En conclusión, excepto para los sondeos Te27 y Te34, el valor medido de señal máxima E_0 y el tiempo máximo calculado de T_2^* parecen también mantener una aceptable relación con los caudales esperables en un lugar. Para los Te15 y Te11, en el momento de la realización de los SRM se adaptan mejor los valores mínimos del rango medido en los pozos. *En cualquier caso, hay que tener en cuenta que los caudales aquí considerados tienen un escaso valor como estimadores de la capacidad o comportamiento de un pozo, debido a la forma en que fueron obtenidos.*

Se ha buscado también la relación entre algunos parámetros medidos y derivados de los SRM, a fin de estimar su capacidad de detección de anomalías. Están representados en la Figura 12:

- a) Relación entre la porosidad máxima w (% agua) y la permeabilidad máxima k calculada mediante la ecuación $k = C_p w T^2$, para todos los sondeos en los que se pudo medir la constante de tiempo T_1 . Se ha utilizado el coeficiente $C_p = 5.94 \cdot 10^{-8}$ (obtenido con solamente los Te45, Te44, Te27 y Te34). De nuevo se pone de manifiesto las diferencias de comportamiento hidráulico entre los diferentes lugares medidos, siendo el acuífero en los emplazamientos Te15 y Te26 de mayor permeabilidad que en el resto, no dando esto lugar a un mayor contenido de agua en los momentos de la medición de los SRM pertenecientes al grupo que denominamos “arcillas” (relacionado con turbas, tobas y travertinos) en la determinación de la constante de calibración (ver Figura 9b). La otra agrupación la forman los sondeos del tipo “gravas”, que con bajos valores de permeabilidad, llegan a altos contenidos en agua. Se recuerda que la denominación “gravas” y “arcillas” se refiere a la litología predominante, según las columnas facilitadas, donde los SRM han detectado la existencia de agua libre (ver Figura 8). Para los sondeos Vi2, To4 y Te42, medidos con T_1 pero para los que no se dispone de valores de ensayos de bombeo, la estimación hecha de permeabilidad con el coeficiente C_p es aceptable.
- b) Relación entre la porosidad máxima w (% agua) y la máxima amplitud E_0 de la señal medida. Puede considerarse una medición de calidad del SRM, ya que ambos parámetros están teóricamente relacionados. El ajuste de una recta al conjunto deja apreciar desviaciones en algunos sondeos. En el Te15 y SGOP1 es debido a la gran diferencia entre los máximos valores medidos y los recalculados en la inversión, como puede apreciarse en los gráficos del **ANEXO III-D**; en la interpretación aparecen acuíferos muy superficiales con alto contenido en agua, pero que no es capaz de reproducir las mediciones, posiblemente debido a la influencia de picos de ruido. En el Te34 se trata claramente de una lectura ruidosa, aunque no con el mismo efecto que en los anteriores, por ser un SRM de valores sólo crecientes. En el Te36 no se encuentra explicación para esta desviación. Además, en el Te44, se ha eliminado el valor máximo (350 nV) previamente a la inversión, por lo que no aparece reflejada su desviación en este gráfico.
- c) Relación entre el valor de E_0 máximo y la transmisividad T_{eb} de los ensayos de bombeo. Es otra forma de ver las relaciones expuestas en la Figura 9 a, aunque al utilizar los valores medidos (en lugar de los calculados) permite ratificar la existencia de dos ambientes claramente diferentes. En el ambiente “arcillas”

(Te11, Te15 y Te26) existe poca amplitud de señal (poca cantidad de agua) pero gran transmisividad, mientras que lo contrario caracteriza el ambiente "gravas". La lectura máxima del SRM SGOP1 se destaca aquí nuevamente como errónea.



Relaciones entre parámetros de SRM

Figura 12 Relación entre el nivel piezométrico medido en los pozos y determinados por SRM; otras relaciones de parámetros en el Jiloca

En definitiva, el cruce de estos parámetros parece ser de utilidad para la verificación de la existencia de ciertas anomalías en las lecturas de los SRM, que evidentemente se traducirán luego en anomalías de los parámetros determinados en la inversión, así como para ratificación de conclusiones establecidas en función de otros criterios.

d) Finalmente, se ha intentado correlacionar las mediciones de nivel piezométrico efectuadas en los pozos con las estimadas a través de la interpretación de los SRM. Es preciso tener en cuenta dos aspectos: por una parte, no podemos asegurar que los valores piezométricos medidos se refieran a la misma fecha de

realización de las mediciones de los SRM; por otra parte, la precisión del inicio de una capa acuífera en un SRM no puede ser mejor de 5 m a partir de una profundidad superior a 20-25 m (ver Figura 2). Otras desviaciones pueden ser debidas a la diferencia que puede establecerse entre el nivel medido y la profundidad del acuífero, según el tipo de confinamiento existente. Con estas salvedades, la Figura 12d muestra ciertamente una correlación, aunque en este caso, con desviaciones muy grandes.

[página dejada intencionadamente en blanco]

9 ENSAYO EN EL ALUVIAL DEL GÁLLEGO

A fin de poder efectuar mediciones en una zona donde la cantidad de agua existente en esas fechas fuera mayor que en el río Jiloca, el día 27 de septiembre de 2002 se efectuó el SRM 1027 en la zona del río Gállego, en las proximidades del sondeo 2814-1-27 (posición en mapa de **ANEXO IV-A** sobre cartografía geológica, y **ANEXO IV-B** sobre fotografía aérea de detalle).

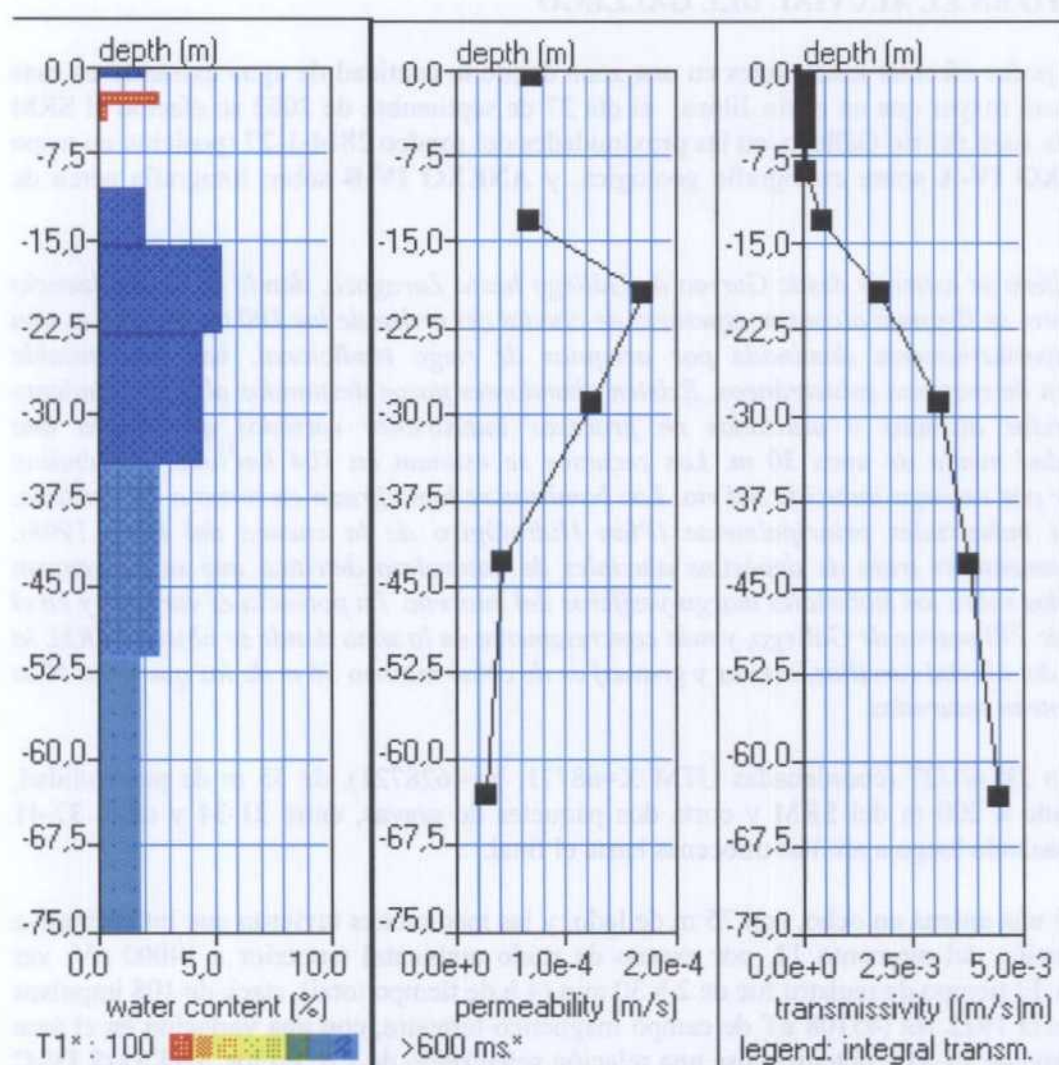
Este acuífero se extiende desde Gurrea de Gállego hasta Zaragoza, donde en la confluencia con el Ebro, se llegan a alcanzar espesores de aluvial del orden de los 100 m. Aunque es una zona mayoritariamente dominada por acequias de riego tradicional, hay una notable extracción de recursos subterráneos. Existen abundantes pozos destinados al abastecimiento de viviendas aisladas o utilizados en procesos industriales variados que tienen una profundidad media de unos 30 m. Los recursos se estiman en 104 hm³/año, pudiéndose aumentar por recarga inducida del río. Los bombeos se han cifrado en torno a 20 hm³/año, con fines industriales principalmente (Plan Hidrológico de la cuenca del Ebro 1998). Litológicamente se trata de depósitos aluviales de naturaleza detrítica que se encuentran depositados sobre los materiales margo-yesíferos del mioceno. La potencia es variable y en el entorno de Villanueva de Gállego, y más concretamente en la zona donde se ubica el SRM, la potencia del aluvial (arcillas, arenas y gravas) es de cómo mínimo 56 m de los que unos 40 m se encuentran saturados.

El sondeo 2814/1/27 (coordenadas UTM X=68771, Y=4628721), de 55 m de profundidad, está situado a 200 m del SRM y corta dos paquetes de gravas, entre 21-34 y entre 37-41 metros, pasando luego a arcillas miocenas hasta el final.

Se utilizó una antena en ocho, con 75 m de lado, y las mediciones tuvieron que interrumpirse en la emisión del momento 11, por exceso de ruido ambiental (superior a 14000 nV, ver Figura 5). El tiempo de registro fue de 2 h 30 min.(4 h de tiempo total), stack de 108 impulsos y frecuencia 1922 Hz (45108 nT de campo magnético terrestre, con una variación en el área de la antena de 15 nT), obteniéndose una relación señal/ruido de 1.6. En los **ANEXOS IV-C IV-D** y **IV-E** se recogen los gráficos de la medición en campo, el fichero resultado de la inversión, y cálculo del coeficiente de calibración.

Los resultados, a pesar de la poca penetración conseguida, apuntan hacia la existencia de un acuífero de materiales de grano medio-grueso entre los 10 y los 35-40 m de profundidad, lo que presenta buena coincidencia con el corte litológico, con un contenido en agua del 5%, que pudiera ser mayor y estar más concentrada. La porosidad calculada a mayores profundidades no tiene probabilidad de ser cierta, dada la poca intensidad del momento máximo emitido (2500 A ms), aunque la suave tendencia de decaimiento de la señal recibida permite asegurar la continuidad del acuífero en mayor profundidad.

Los datos conocidos sobre ensayos de bombeo en este lugar dan un valor de 385 m²/día. No obstante, en este mismo acuífero, se han medido valores de hasta 4000 m²/día, en lugares con doble potencia de gravas que en este emplazamiento. Con la transmisividad calculada con los datos del SRM, el coeficiente de calibración sería de Cp=6.86E-09 (pasaría a 7.13E-08 tomando la transmisividad de 4000 m²/día). La distribución de permeabilidad y transmisividad acumulada obtenidas con este coeficiente se muestra en la Figura 13.



Distribución del contenido en agua, permeabilidad y transmisividad acumulada en el SRM 1027, zona del Gállego. Valores calculados con el coeficiente $CP=6.86e-09$

Figura 13. Gráficos de distribución del contenido en agua, tamaño de grano (T1) , permeabilidad y transmisividad acumulada para el SRM 1027 medido en la zona del Gállego.

10 ZONA DEL ALUVIAL DEL OJA O GLERA

10.1 Hidrología de la zona

Esta unidad hidrogeológica se extiende a lo largo del aluvial y las terrazas del río Glera, desde Santurdejo hasta Casalarreina (comunidad autónoma de La Rioja). La recarga principal del acuífero procede del propio río y de los barrancos laterales, situándose la zona de descarga más importante aguas abajo de Castañares de Rioja. La unidad se encuentra moderadamente explotada, con gran proliferación de pozos excavados que resultan parcialmente penetrantes en el acuífero con una profundidad media de 9 m.

Litológicamente este acuífero libre esta constituido por un cuerpo de gravas con matriz arcillosa que presenta una porosidad intergranular media del 22 % y permeabilidad entre 100 y 200 m/d, situado sobre los materiales margosos de edad miocena. La geometría de este paquete detrítico es variable según las zonas, lo que determina que la potencia del acuífero llegue hasta los 30 m, aunque casi todo el flujo se concentra principalmente en los niveles superiores.

Los parámetros hidrogeológicos arrojan valores muy dispares debido por un lado a la ya referida potencia variable, y por otro al porcentaje de finos de estas gravas. Así, en la zona que se encuentra en el rango de oscilación periódica de los niveles piezométricos estos finos se han lavado y es esperable una mayor porosidad en este tramo, que condicionaría un flujo preferente de las aguas subterráneas por este nivel superficial.

La situación, sobre la cartografía geológica, de los SRM efectuados se encuentra en el **ANEXO V-A**. La información de los sondeos mecánicos existentes (todos ellos de profundidad inferior a los 16 m) en las proximidades de los SRM medidos se encuentra recogida en el **ANEXO V-C**. El sondeo 2110/3/368 es el único que corta las margas del Mioceno, a 14 m de profundidad.

10.2 Toma de datos en campo

La campaña de SRM en el valle de río Oja tuvo lugar entre los días 30 de septiembre y 4 de octubre de 2002, midiéndose un total de 10 SRM. Al igual que ocurrió en el río Jiloca, la preselección de emplazamientos, efectuada en función de la mejor disponibilidad de información de parámetros hidrogeológicos, no pudo ser estrictamente seguida, debido a dificultades de localización y/o a la existencia de exceso de ruido electromagnético, midiéndose finalmente en los sitios que se citan en el cuadro siguiente, junto con los parámetros utilizados y características de cada SRM; su situación de detalle con indicación de la posición del bucle utilizado en cada caso, se encuentra recogida en el **ANEXO V-B** sobre fotografía aérea y en la Figura 14 junto con la situación de los SEV y sondeos mecánicos disponibles.

ZONA	FECHA	SRM	SONDEO	ht	hm	T	ANTENA	f Hz	Q	STACK	RUIDO nV	B nT	inc B	S/R	cali
OJA	30-sep-02	7004	2110-7004	3:40	2:00	T1	oo de 50	1928	16	64	628	45257	11	1,89	B
OJA	30-sep-02	7007	2110-7007	3:25	3:00	T1	oo de 50	1924	16	96	380	45193	5	1,77	B
OJA	01-oct-02	7014	2110-7014	3:30	1:00	T1	o de 75	1928	16	32	172	45275	6	1,15	M
OJA	01-oct-02	3026	2110-3026	5:05	4:45	T1	oo de 50	1926	16	196	3770	45219	5	0,63	MM
OJA	02-oct-02	3368	2110-3368	2:30	2:00	T1	oo de 37,5	1927	16	64	250	45246	6	1,06	MM
OJA	02-oct-02	3264	2110-3264	2:45	1:45	T1	oo de 50	1926	16	64	135	45233	6	4,25	MB
OJA	03-oct-02	3264n	2110-3264	3:00	1:50	T1	oo de 50	1928	16	64	609	45282	3	1,52	R
OJA	03-oct-02	8060	2109-8060	3:30	2:45	T1	oo de 50	1927	16	96	350	45254	8	4,09	B
OJA	04-oct-02	3142	2110-3142	3:00	2:20	T1	oo de 50	1929	16	96	250	45294	6	2,07	B
OJA	04-oct-02	4067	2110-4067	2:50	2:25	T1	oo de 50	1927	16	96	185	45255	4	1,55	R

Tabla srmmedicionOJA

SRM: nombre adjudicado al SRM y fichero de datos

Sondeo: nombre del sondeo mecánico más próximo

ht: tiempo total en horas empleado, incluyendo desplazamiento entre sondeos, extensión y recogida de la antena, medición de test, configuración instrumental, etc.

hm: tiempo en horas de la medición final

T: T1 indica que se ha medido con dos convertidores, por lo que puede estimarse valores de permeabilidad con el parámetro T_1

Antena: configuración del bucle utilizado como antena emisora-receptora

fHz: frecuencia de emisión, calculada por la medición del campo magnético B (nT) en cada zona ($f=0.04258 B$)

Q: número de momentos de emisión registrados

Stack: número de pulsos sumados en la medición para cada momento.

Ruido nV: nivel de ruido ambiental medido en el emplazamiento

B: intensidad media del campo magnético terrestre en el área de la antena el día de la medición en nT

Inc. B: máxima variación de B en el área de la antena

S/R: relación Señal/Ruido, obtenido tras el proceso de los datos (valor indicativo, que puede diferir según los parámetros de proceso seguido)

Cali: estimación subjetiva de la calidad final del SRM, en una escala de MB B R M MM

El tipo de antena utilizado en esta zona ha sido fundamentalmente de un bucle en ocho de 50 m de lado, dada la poca profundidad y potencia del acuífero a investigar. En el SRM 3368 se disminuyeron las dimensiones, debido al exceso de ruido inicial (superior a los 5000 nV), que se consiguió reducir a 250 nV. Se aumentó a un cuadrado de 75 m en el SRM 7014 debido al bajo nivel de ruido y a intentar alcanzar una mayor penetración. En todos los emplazamientos pudo medirse con dos convertidores, calculándose por lo tanto el tiempo T_1 .

ZONA DEL OJA

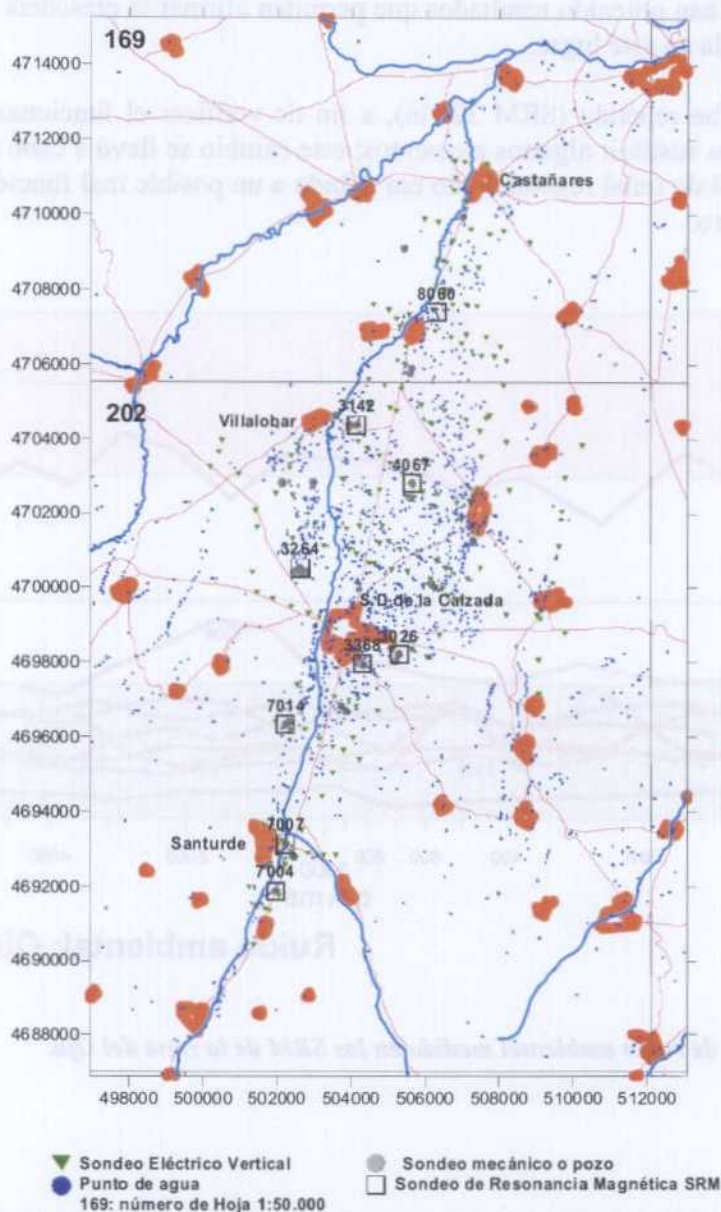
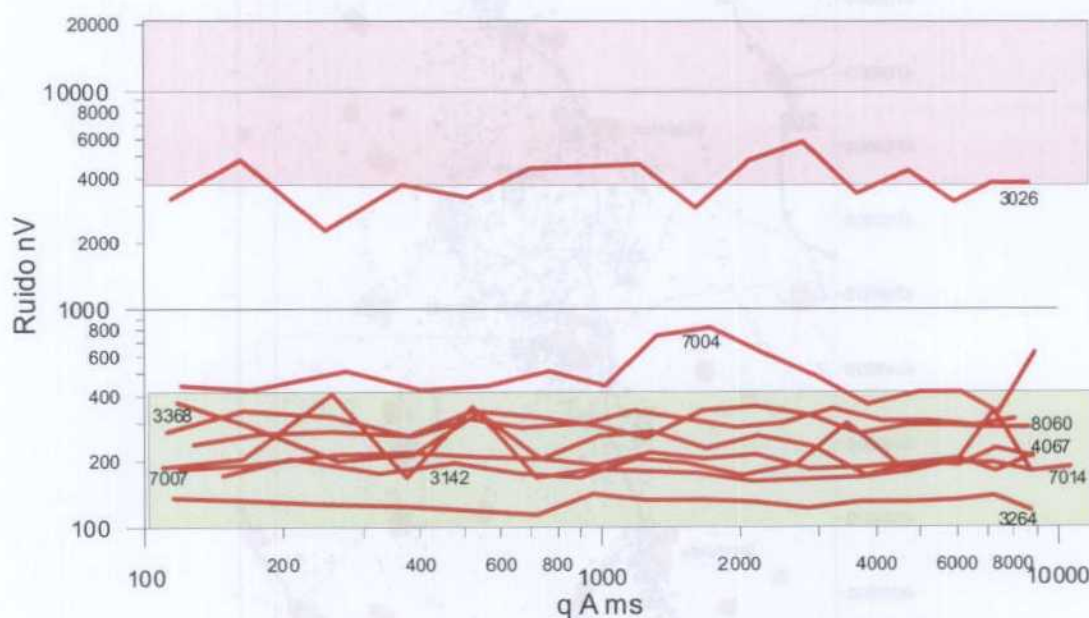


Figura 14 Mapa de posición de los SRM en la zona del Oja. Hojas 1:50.000 n° 202 y 169. Coordenadas UTM

Comparada con la zona del río Jiloca, la zona ha presentado un nivel de ruido inferior, (Figura 15, ver también Figura 5), estando en general por debajo de los 400 nV. La amplitud de la señal máxima ha sido muy baja, entre 10 y 66 nV, indicativo de una escasa presencia de agua en el subsuelo. Gracias a la baja intensidad del ruido, se ha podido, no obstante, obtener registros con una relación señal/ruido que ha resultado buena al menos para cinco mediciones y regular para otras tres. El campo magnético terrestre se sitúa entorno a las 45.250 nT, con variación de hasta 100 nT entre todos los emplazamientos; dentro del área de cada antena, el campo magnético es muy homogéneo, con oscilaciones del orden de 3 a 11 nT.

A la vista de los resultados del río Jiloca, se aumentó el stacking a 64 y 96 pulsos por momento; en el SRM 3026 se aumentó a 196, con cerca de 5 horas de grabación, a pesar de lo cual no se han obtenido resultados que permitan afirmar la presencia de agua en la cantidad esperada en este lugar.

El SRM 3264 fue repetido (SRM 3264n), a fin de verificar el funcionamiento de los instrumentos tras sustituir algunos elementos; este cambio se llevó a cabo para asegurar que el bajo nivel de señal registrado no era debido a un posible mal funcionamiento del equipo de registro.



Ruido ambiental: Oja

Figura 15. Nivel de ruido ambiental medido en los SRM de la zona del Oja.

10.3 Matriz de Inversión

Para el cálculo de la matriz de inversión se ha contado con los datos procedentes del informe de la Confederación Hidrográfica del Ebro: "*Síntesis hidrogeológica de la unidad 24 aluvial del río Glera*" de Abril de 1991. En este informe se analizan los datos de tres campañas de SEV realizadas por el IGME, el Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP) y la propia Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). En la Figura 14 se indica la situación de los SEV disponibles. Las tres campañas fueron interpretadas de manera independiente, con diferentes programas y técnicos. Para la creación del modelo de resistividad sólo se han tenido en cuenta las campañas del SGOP y de la CHE, que son las que se distribuyen principalmente por la zona donde se han medido los SRM. Los SEV más próximos a los SRM son los del SGOP, pero los SEV de la CHE son los que presentan una interpretación de más detalle. En el informe citado se representan dos modelos en la zona: el primero de ellos es el correspondiente al aluvial del río Glera, donde se han medido la mayoría de los SRM, el cual presenta una capa superficial muy resistiva que se correlaciona con materiales de aluvial por encima del nivel freático, seguido de un tramo también resistivo pero de menor valor de resistividad que el anterior, y que se correlaciona con las arenas y areniscas que forman el acuífero; por debajo se encuentra el substrato conductor impermeable. El segundo modelo corresponde a las terrazas próximas fuera del aluvial del Glera, y en donde desaparece el tramo de arenas y areniscas y solamente aparece un tramo resistivo por encima del substrato conductor; algunos SRM (4067, 3026 y 3368) se han medido en este ambiente.

El modelo general adoptado corresponde al primer caso, tramo del aluvial del río Glera, y sus valores procedentes de los datos de los SEV son:

0 a 5.5 m	850 ohmio.metro
5.5 a 16m	140 ohmio.metro
16 a 80m	11 ohmio.metro

A partir de este modelo se han calculado las siguientes matrices:

- Matriz OJA75.mrm: antena formada por un cuadrado de 75 m de lado, inclinación de campo magnético de 55°, frecuencia de 1928 Hz, profundidad máxima.= 80 m y Qmax= 10700.0 A ms.
- Matriz OJA8375.mrm: antena en ocho de 37.5 m de lado, inclinación de campo magnético de 55°, frecuencia de 1927 Hz , profundidad máxima= 40 m y Qmax= 8500.0 A ms)
- Matriz OJA850.mrm: antena en ocho de 50 m de lado, inclinación de campo magnético de 55° , frecuencia de 1927 Hz, profundidad máxima = 50 m y Qmax= 8800.0 A ms

10.4 Interpretación

A partir de los datos de campo, y con las pautas indicadas en el capítulo 3 de este Informe, se ha realizado la inversión de las mediciones. Para cada SRM se han efectuado varias pruebas de proceso, hasta encontrar el mejor ajuste. En el ANEXO V-D se recogen los gráficos $E(t)$, $E_o(q)$, $Namb(q)$, $T_2^*(q)$, $f(q)$, $fase(q)$ y $w(q)$. Los ficheros (*.nov) resultado del proceso de inversión se encuentran en el ANEXO V-E. En la tabla siguiente se resumen los parámetros de proceso finalmente adoptados, con indicación en algún caso de otros utilizados y cuyos resultados gráficos también se adjuntan

proceso de datos de SRM zona del OJA						
SRM	r.a.f. time conts. ms	S/N	error ajuste %	p.regularización.cpx		observaciones.
8060	15	3,2	4,9	297	8,26E-07	
8060	15	2,6	3,7	305	8,26E-07	sin q=14,15,16 adop.
3142	15	1,7	8,3	610	8,26E-07	
4067	15	1,3	6,5	610	8,26E-07	
3264	15	3,7	3,6	366	8,26E-07	
3026	15	0,5	8	366	8,26E-07	notch wide
3368	25	0,9	12,5	274	8,26E-07	
7014	25	1,2	9,4	137	8,26E-07	
7014	25	1,1	7,7	122	8,26E-07	sin q=14 adop.
7007	15	1,4	6	160	8,26E-07	
7007	15	1,3	5,6	125	8,26E-07	sin q=16 adop.
7004	15	1,2	7,1	244	8,26E-07	

TablaProcesoOJA

En este apartado se muestran solamente los gráficos de distribución del contenido de agua $w(z)$. Los gráficos de distribución de la permeabilidad $k(z)$ y transmisividad acumulada $T(z)$ en función de la profundidad para los SRM en los que ha podido medirse el tiempo T_1 serán presentados en el apartado 10.5.3.

En lo que sigue, al referirnos a potencias de capas de la interpretación debe tenerse en cuenta la distribución efectuada en el proceso de inversión, según fue explicado anteriormente y reflejado en la Figura 2.

Tanto en las curvas $E(t)$ de esta zona como en su espectro de frecuencias, no se aprecia contaminación electromagnética que perjudique la señal, excepto en el SRM3026, junto a Santo Domingo de la Calzada, cuya frecuencia de resonancia es de 1928 Hz y está apartada de los armónicos de 50 Hz. En consecuencia, solamente se ha aplicado un filtro notch para dicho sondeo y un suavizado de 15-25 ms de longitud en el resto. El ajuste conseguido está entre el 4 % y el 12%, con parámetro de regularización bajo, condensando por tanto el agua en pocos tramos.

Para la descripción de los resultados se han agrupado los SRM según su situación geográfica formando un perfil Norte-Sur; en la Figura 16 se muestran los resultados de la inversión junto con el perfil de permeabilidad.

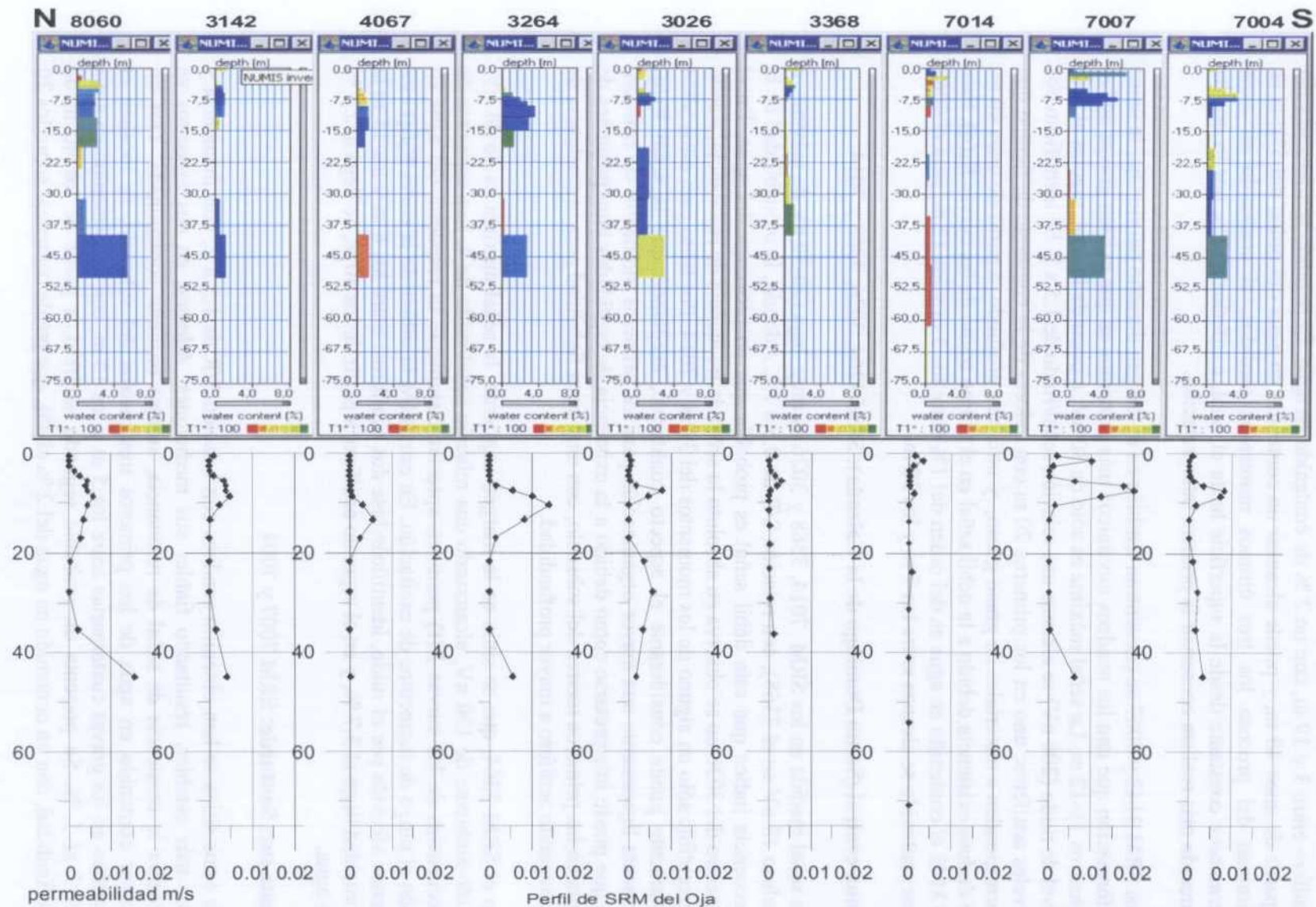


Figura 16. Perfil de interpretación de la distribución del contenido en agua y de T_1 (tamaño del grano) de los SRM medidos en la zona del Oja, con indicación de las permeabilidades calculadas.

Zona norte: Castañares – Santo Domingo: SRM 8060, 3142 y 4067

Próximo a Castañares se encuentra el SRM 8060, donde se obtiene una buena señal, con un valor máximo de 65 nV y relación S/R de 3, lo que permite identificar un primer acuífero entre 3 y 19 m, con un 2 % de contenido en agua. El segundo acuífero se sitúa a partir de unos 40 m, y puede alcanzar un contenido en agua del orden del 5%; si se eliminan del proceso los tres últimos momentos medidos, el contenido en agua permanece constante desde la superficie hasta el final, e inferior al 2%, por lo que ha parecido más realista conservar la primera interpretación.

Los SRM 3142 y 4067 se encuentran también en el margen derecho del río Oja; la única información que dan los sondeos mecánicos más próximos es que existen gravas en los primeros 11-12 m. La señal máxima es sólo de 30 nV, a pesar de lo cual, gracias al bajo nivel de ruido (200 nV) se alcanza una relación señal/ruido de 1.5 a 2. Se identifican dos niveles acuíferos: uno en los primeros 20 m con valores de la constante de tiempo que corresponden a materiales de grano grueso, y otro más profundo, a partir de unos 40 m, de dudosa existencia debido a la débil señal en el último tramo de las curvas $E_0(q)$. Para el 3142 el contenido en agua es del orden del 1% entre los 5 m y los 12 m; para el 4067 este contenido se alcanza entre los 7 m y los 20 m.

Zona central (Santo Domingo de la Calzada): SRM 3264, 3026, 3368 y 7014

La señal medida en los SRM 7014, 3368 y 3026 es muy baja (20-30 nV de máximo, e incluso 10 nV en el 3368), con relación S/R de 0.5 a 1.2. Además, la inestabilidad de la frecuencia indica que esta débil señal es probable que no provenga del agua. En el espectro del 3026 no se observa en absoluto la señal de frecuencia de resonancia, siendo perceptible sólo en alguno de los momentos del 3368 y 7014. Por tanto para estos SRM solamente puede considerarse el aspecto cualitativo, aceptando que la señal $E_0(q)$ presenta ligeramente una mayor organización para los primeros momentos de emisión, lo que puede interpretarse como debido a la existencia de cantidades muy pequeñas de agua en los primeros metros del subsuelo, con muy poca fiabilidad para la existencia de un segundo acuífero a mayor profundidad.

En el SRM 3264, que se sitúa en la margen izquierda, la señal máxima es de 44 nV, ruido ambiente de 130 nV, alcanzando una relación señal/ruido de 4. Los espectros de frecuencias de las curvas $E(t)$ permiten apreciar claramente la respuesta del agua en todo el rango de momentos de excitación. En este SRM la subida de la curva $E_0(q)$ está menos afectada por el ruido, identificándose dos acuíferos: entre los 6 m y los 15 m la porosidad llega al 3.7 %, y en el segundo acuífero, a partir de los 40 m, se llega al 2.7 % de agua.

Zona sur, Santurde: SRM 7007 y 7004

En estos sitios se han obtenido sondeos con relación S/R de 1.5 a 2, con frecuencia y fase más estables, resultando fiables sus mediciones. Además, en sus espectros se observa la existencia de señal de resonancia, aunque bastante contaminada. Tras un primer contenido en agua de los primeros tres metros del subsuelo, se localiza el acuífero en las gravas cuaternarias entre los 5 m y los 12 m, con un contenido en agua del 3 al 5 %. Se presenta un probable segundo acuífero, a partir de los 40 m de profundidad, con un contenido en agua del 2 % al 4%, que puede comenzar sobre los 20

m y con menor porosidad (0.6%). La eliminación de la última medición del SRM 7007 en el proceso de inversión, mantiene la existencia del segundo acuífero, aunque bajando el contenido en agua al 2%.

En conclusión para esta zona del río Oja, el nivel de señal obtenida está entre 10 y 60 nV, lo que es una clara indicación de bajo contenido en agua en el subsuelo a las profundidades de investigación. Se detecta con claridad un primer acuífero con base a los 10-20 m, que se debe corresponder con el conocido en esta región como existente en las gravas del cuaternario, con un contenido en agua que, en el momento de las mediciones, era muy bajo (2-4%). Al menos para los emplazamientos 8060, 3264, 7007 y 7004 la inversión sitúa un segundo acuífero a partir de los 30 m de profundidad, que puede alcanzar una porosidad del 4-6%. En el perfil de valores de permeabilidad calculados se aprecia bien la evolución a lo largo del valle de estos dos acuíferos.

La presencia del acuífero más profundo es dudosa, y su aparición en los resultados de la inversión puede ser debida a que en el sistema de cálculo actualmente disponible no se tiene en cuenta nada más que la componente principal de la función teórica. Los resultados encontrados en este Proyecto están haciendo revisar los algoritmos de cálculo, observándose que en presencia de terrenos muy conductores bajo el acuífero, como es el caso del Oja, puede ser necesario considerar más componentes, ya que de lo contrario, y debido al desfase que produce la alta conductividad, se provoca una subida en la curva $E_0(q)$, equivalente a la producida por la presencia de un acuífero en profundidad. Recálculos provisionales efectuados sobre estas curvas así lo confirman, habiéndose encontrado soluciones válidas con una sola capa de agua en las arenas y gravas del Cuaternario (comunicación personal del A. Legchenko).

10.5 Determinación de parámetros hidrodinámicos

10.5.1 Datos de partida

La información hidrogeológica disponible está reflejada en el siguiente cuadro:

zona	SRM	nºinventario	Toponimia	X	Y	cota	prof	caudal l/s	Transmi.m2/día	nivel pz
oja	7004	2110-7004	El Molino	501964	4691871	730	7,6	20	[1505] 2000	5,24
oja	7007	2110-7007	Puente Santurde	502234	4693136	645	7	35	[4427] 5500	2,58
oja	7014	2110-7014	Pata Gallina	502233	4696335	680	8	22	2700-3350 (3025)	7,37 ?
	7014	2110-3668	Gravera-1 IGME	502355	4696415	668	14		[2162-2318]	4,09
oja	3026	2110-3026	El Silo	505297	4698221	640	8,2	32,5	1600-3425 (3255)	
	3026	2110-3104		504851	4698622	645	7,5			3,31
	3026	2110-3025	piezómetro 1							4140
	3026	2110-3027	piezómetro 2							3855
oja	3368	2110-3368	Vía del tren	504313	4697956	648	16			4,09
oja	3264	2110-3264	Las Abejas	502616	4700533	619	7,4	40	7850 (7695)	
	3264	2110-3262	piezómetro 1						[6324] 6880	
	3264	2110-3263	piezómetro 2							6880
	3264	2110-3265	piezómetro 3							9170
	3264	2110-3348		503091	4703831	580	12,9			9,96
oja	8060	2109-8060	Cemente. Castañeros	506293	4707413	538	8,2			3,01
oja	3142	2110-3142	Cemt. Villalobar	504145	4704376	575	11	32	8000 (4700)	5,24?
	3142	2110-3064	piezómetro						[5621] 1400	
oja	4067	2110-4067	Cº Los terreros	505633	4702817	588	12	18	1100 (1670)	
	4067	2110-42702	piezómetro							2240
	4067	2110-40262		506282	4702813	589			[2063-2371]	12,47

En azul, datos nuevos 09-04 (A.Azcón); entre paréntesis el valor medio adoptado; entre corchetes, datos anteriores
Tabla srnhidrauOJA

Para los valores de transmisividad se indica entre corchetes los datos suministrados antes de la revisión efectuada para este Proyecto. Cuando para un mismo SRM se dispone de información de varios sondeos próximos, se ha adoptado para los cálculos el promedio de los mismos (valor entre paréntesis).

10.5.2 Calibración para la zona del Oja

Con los valores suministrados de transmisividad, y siguiendo el procedimiento explicado en el párrafo 8.5.2, se han obtenido los resultados expuestos a continuación (los cálculos de los coeficientes de calibración C_p y los tramos utilizados pueden verse en el ANEXO V-F, habiéndose utilizado solamente los datos del acuífero situado en el Cuaternario).

No se dispone de ensayos de bombeo próximos a los SRM 3368 y 8060. En la Figura 17-a se han representado los valores de transmisividad T_{eb} de los sondeos frente al valor F_i , donde la pendiente de la recta que une el origen con cada punto es proporcional al coeficiente de calibración ($T_{eb}/F_i=C_p$), observándose que, aunque con menor dispersión que en la zona del río Jiloca (Figura 9), se anticipa la dificultad de aplicar un coeficiente C_p único que pueda representar la situación de la transmisividad en todos los emplazamientos. Habida cuenta de que en este caso es más fiable la uniformidad litológica de los diferentes lugares de medida, esta dispersión puede ser debida a dos

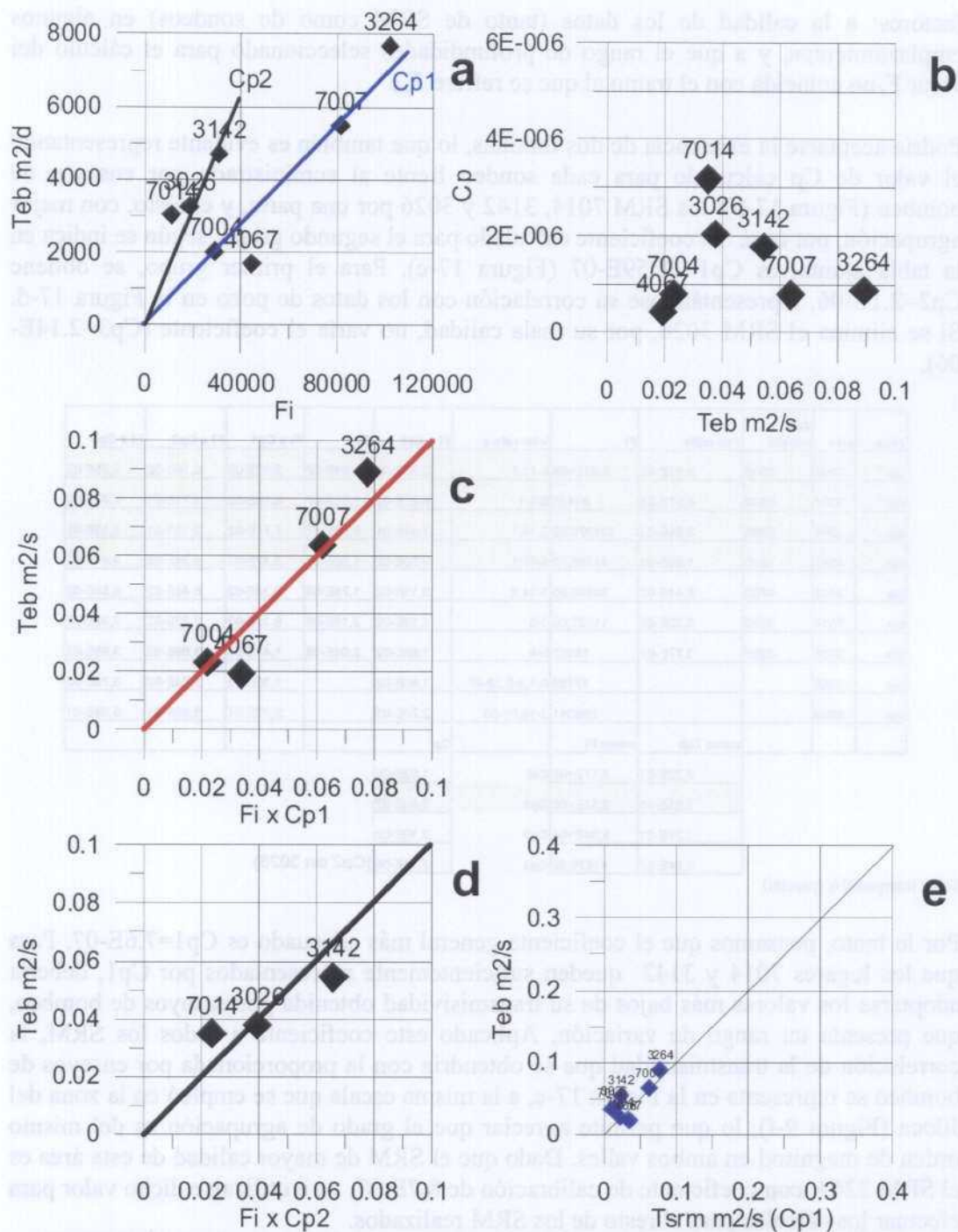
factores: a la calidad de los datos (tanto de SRM como de sondeos) en algunos emplazamientos, y a que el rango de profundidades seleccionado para el cálculo del valor F_i no coincida con el tramo al que se refiere T_{eb} .

Podría aceptarse la existencia de dos familias, lo que también es evidente representando el valor de C_p calculado para cada sondeo frente al suministrado por ensayos de bombeo (Figura 17-b): los SRM 7014, 3142 y 3026 por una parte, y el resto, con mejor agrupación, por otra. El coeficiente calculado para el segundo grupo, según se indica en la tabla adjunta, es $C_{p1}=7.59E-07$ (Figura 17-c). Para el primer grupo, se obtiene $C_{p2}=2.1E-06$, representándose su correlación con los datos de pozo en la Figura 17-d. Si se elimina el SRM 3026, por su mala calidad, no varía el coeficiente ($C_{p3}=2.14E-06$).

zona	srn	Teb m2/dia	Teb m2/s	Fi	Intervalo z	Fi x Cpt	Cp	Fi x Cp1	Fi x Cp2	Fi x Cp3
oja	7004	2000	2,31E-02	2,93E+04	4-11,7	2,97E-02	7,91E-07	2,22E-02	6,16E-02	6,25E-02
oja	7007	5500	6,37E-02	81485	0-9,1	8,27E-02	7,81E-07	6,19E-02	1,71E-01	1,74E-01
oja	3264	7695	8,91E-02	101976,82	5-19,1	1,04E-01	8,73E-07	7,74E-02	2,15E-01	2,18E-01
oja	4067	1670	1,93E-02	44355,75	4-19,1	4,50E-02	4,36E-07	3,37E-02	9,34E-02	9,47E-02
oja	3142	4700	5,44E-02	30849,85	3-14,9	3,13E-02	1,76E-06	2,34E-02	6,49E-02	6,59E-02
oja	7014	3025	3,50E-02	11027,08	0-9	1,12E-02	3,18E-06	8,37E-03	2,32E-02	2,35E-02
oja	3026	3255	3,77E-02	18507	0-9	1,88E-02	2,04E-06	1,41E-02	3,89E-02	3,95E-02
oja	3368			17759	0-1,3-6,32-40	1,80E-02		1,35E-02	3,74E-02	3,79E-02
oja	8060			266041	3-19,31-50	2,70E-01		2,02E-01	5,60E-01	5,68E-01
			suma Teb	suma Fi		Cp				
			3,22E-01	3,17E+05	Cpt	1,02E-06				
			1,95E-01	2,57E+05	Cp1	7,59E-07				
			1,27E-01	6,04E+04	Cp2	2,10E-06				
			8,94E-02	41876,93	Cp3	2,14E-06	(Cp2 sin 3026)			

Tabla interpreOJA (parcial)

Por lo tanto, pensamos que el coeficiente general más adecuado es $C_{p1}=7.6E-07$. Para que los lugares 7014 y 3142 queden suficientemente representados por C_{p1} , debería adoptarse los valores más bajos de su transmisividad obtenida por ensayos de bombeo, que presenta un rango de variación. Aplicado este coeficiente a todos los SRM, la correlación de la transmisividad que se obtendría con la proporcionada por ensayos de bombeo se representa en la Figura 17-e, a la misma escala que se empleó en la zona del Jiloca (Figura 9-f), lo que permite apreciar que el grado de agrupación es del mismo orden de magnitud en ambos valles. Dado que el SRM de mayor calidad de esta área es el SRM 3264, con coeficiente de calibración de $8.7E-07$, va a utilizarse dicho valor para efectuar los cálculos para el resto de los SRM realizados.



Calibración de la transmisividad para los SRM del OJA
 $Cp1=1.02E-06$ $Cp2=7.59 E-07$ $Cp3=2.10E-06$

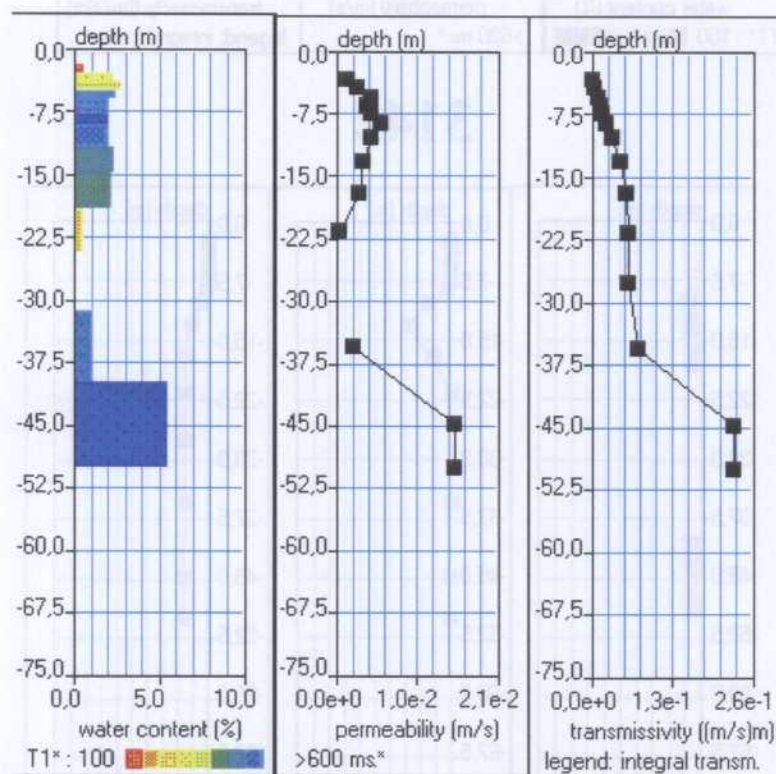
Figura 17 Calibración de la transmisividad en los SRM de la zona del Oja

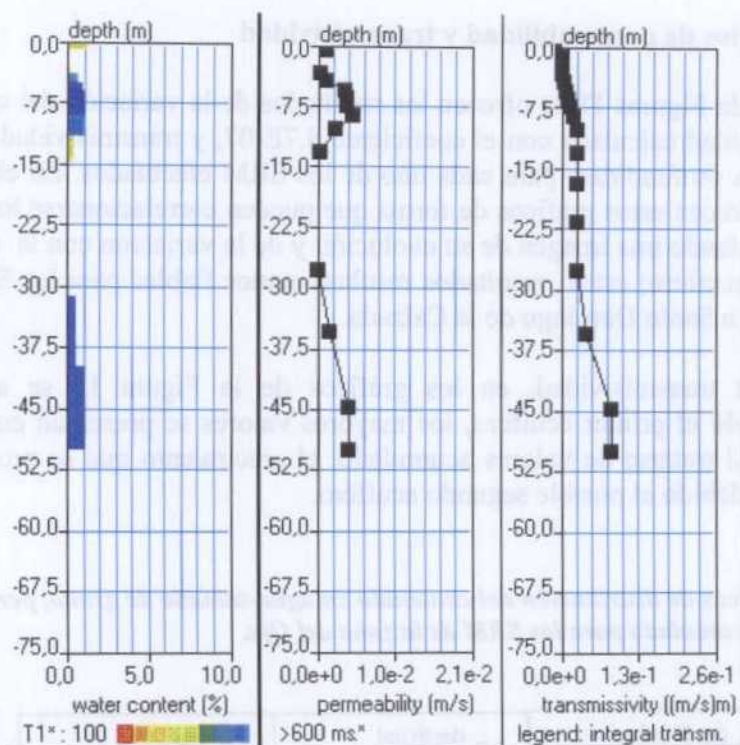
10.5.3 Resultados de permeabilidad y transmisividad

En el conjunto de Figuras 18 se ofrecen los resultados de la variación del contenido en agua, permeabilidad calculada con el coeficiente $8.7E-07$, y transmisividad acumulada, en función de la profundidad, para cada uno de los SRM efectuados. En el perfil de la Figura 16, se ofrecen estos gráficos de forma que pueden correlacionarse los valores de permeabilidad, dando una imagen de su evolución y de la variación con la profundidad y potencia del acuífero; estos resultados resultan menos fiables para los SRM 3026 y 3368, próximos a Santo Domingo de la Calzada.

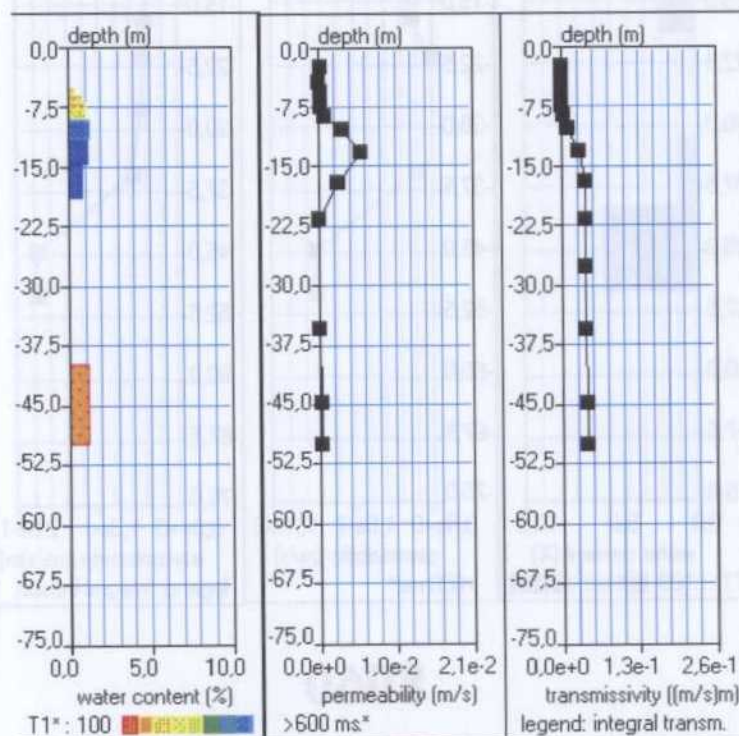
Respecto de la transmisividad, en los gráficos de la Figura 18 se aprecia que, considerando solo el primer acuífero, los mayores valores se presentan en los lugares 3264 y 7007. Al tratarse de valores acumulados, el crecimiento que se produce con la profundidad es debido al posible segundo acuífero.

Figuras 18 Gráficos de distribución del contenido en agua-tamaño de grano, permeabilidad y transmisividad acumulada para los SRM de la zona del Oja.

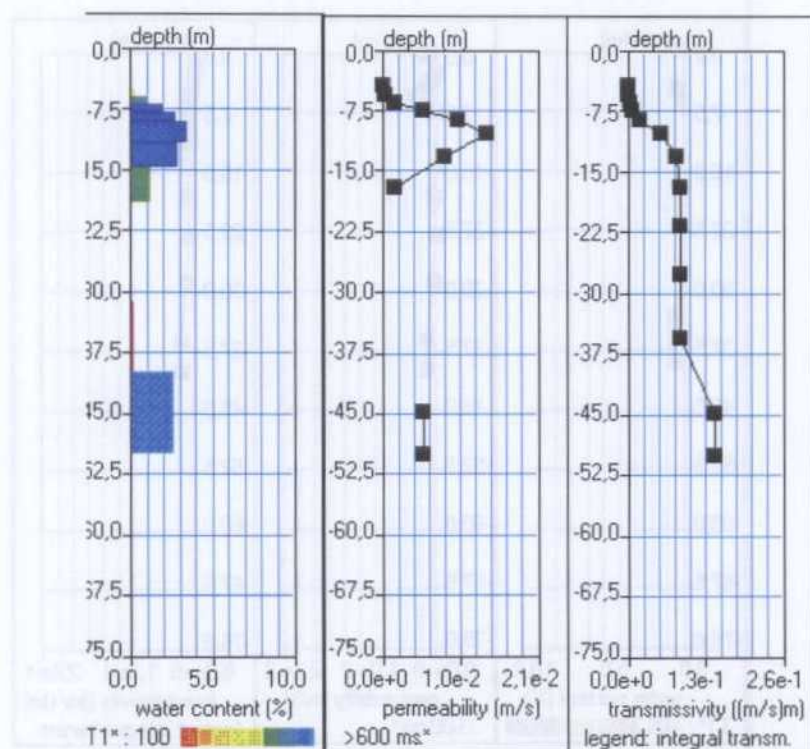




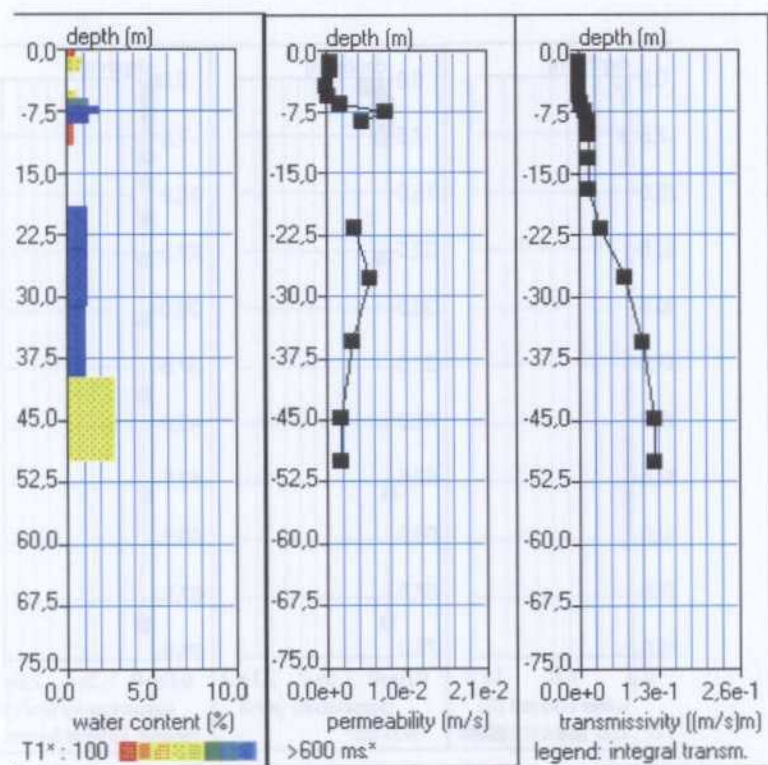
3142



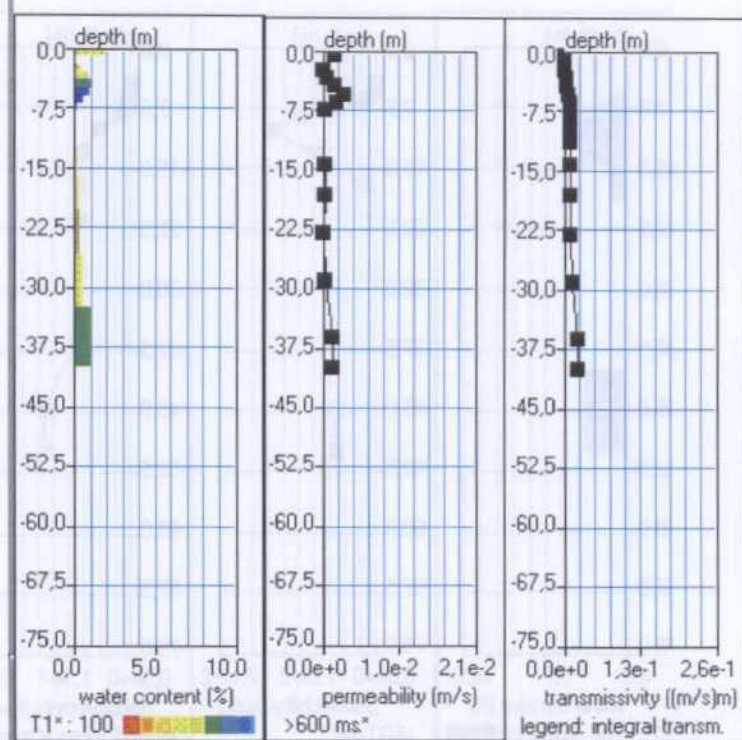
4067



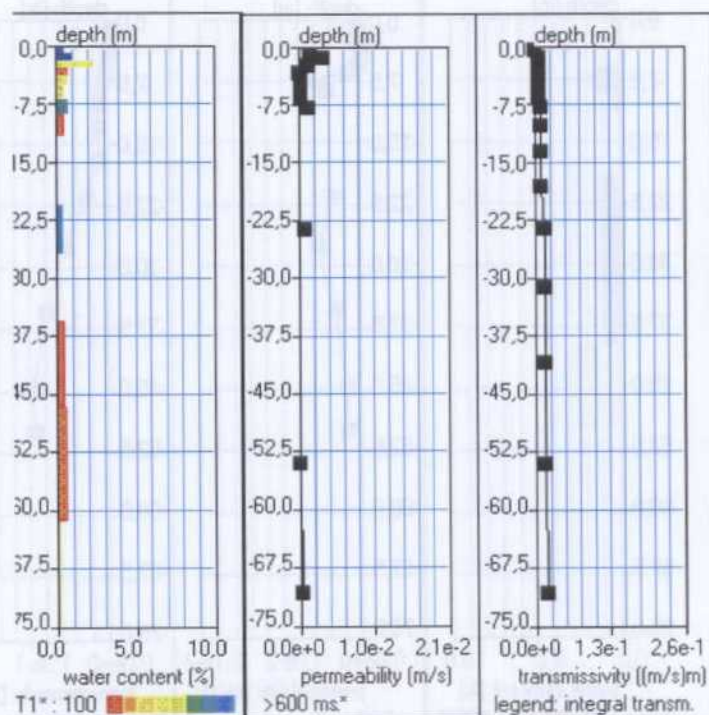
3264



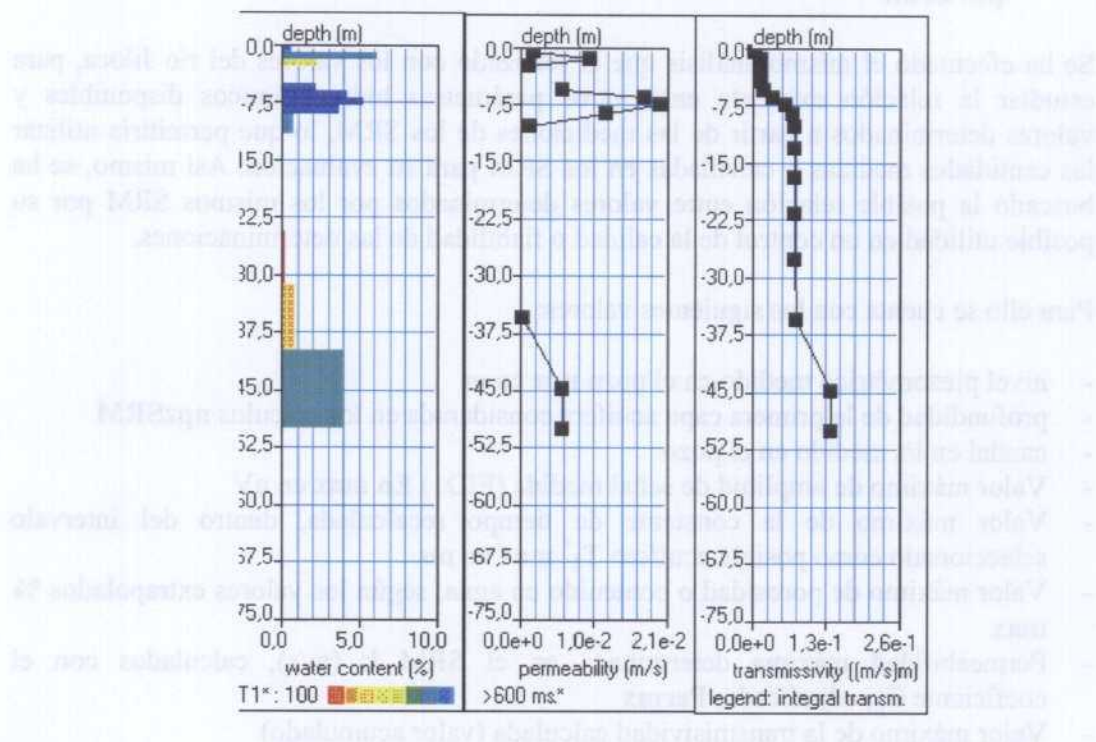
3026



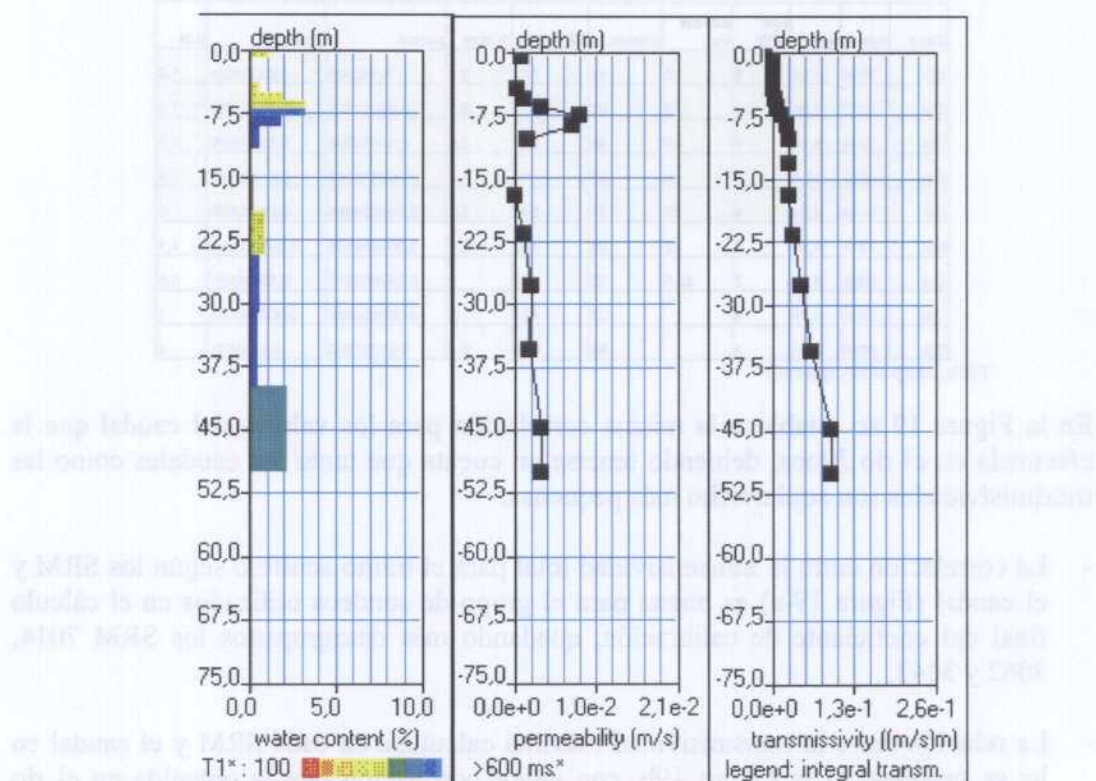
3368



7014



7007



7004

10.5.4 Otras relaciones entre parámetros hidrodinámicos y valores determinados por SRM

Se ha efectuado el mismo análisis que el realizado con los valores del río Jiloca, para estudiar la relación existente entre otros parámetros hidrodinámicos disponibles y valores determinados a partir de las mediciones de los SRM, lo que permitiría utilizar las cantidades medidas o calculadas en los SRM para su evaluación. Así mismo, se ha buscado la posible relación entre valores determinados por los mismos SRM por su posible utilidad en un control de la calidad o fiabilidad de las determinaciones.

Para ello se cuenta con los siguientes valores:

- nivel piezométrico medido en el pozo **npz** en m
- profundidad de la primera capa acuífera considerada en los cálculos **npzSRM**
- caudal en l/s medido en el pozo
- Valor máximo de amplitud de señal medida (FID1) **Eo max** en nV
- Valor máximo de la constante de tiempo recalculada, dentro del intervalo seleccionado como posible acuífero **T₂* max** en ms
- Valor máximo de porosidad o contenido en agua, según los valores extrapolados **% max**
- Permeabilidad máxima determinada en el SRM **k** (m/s), calculados con el coeficiente **C_{px}** adjudicado. **Permx**
- Valor máximo de la transmisividad calculada (valor acumulado)

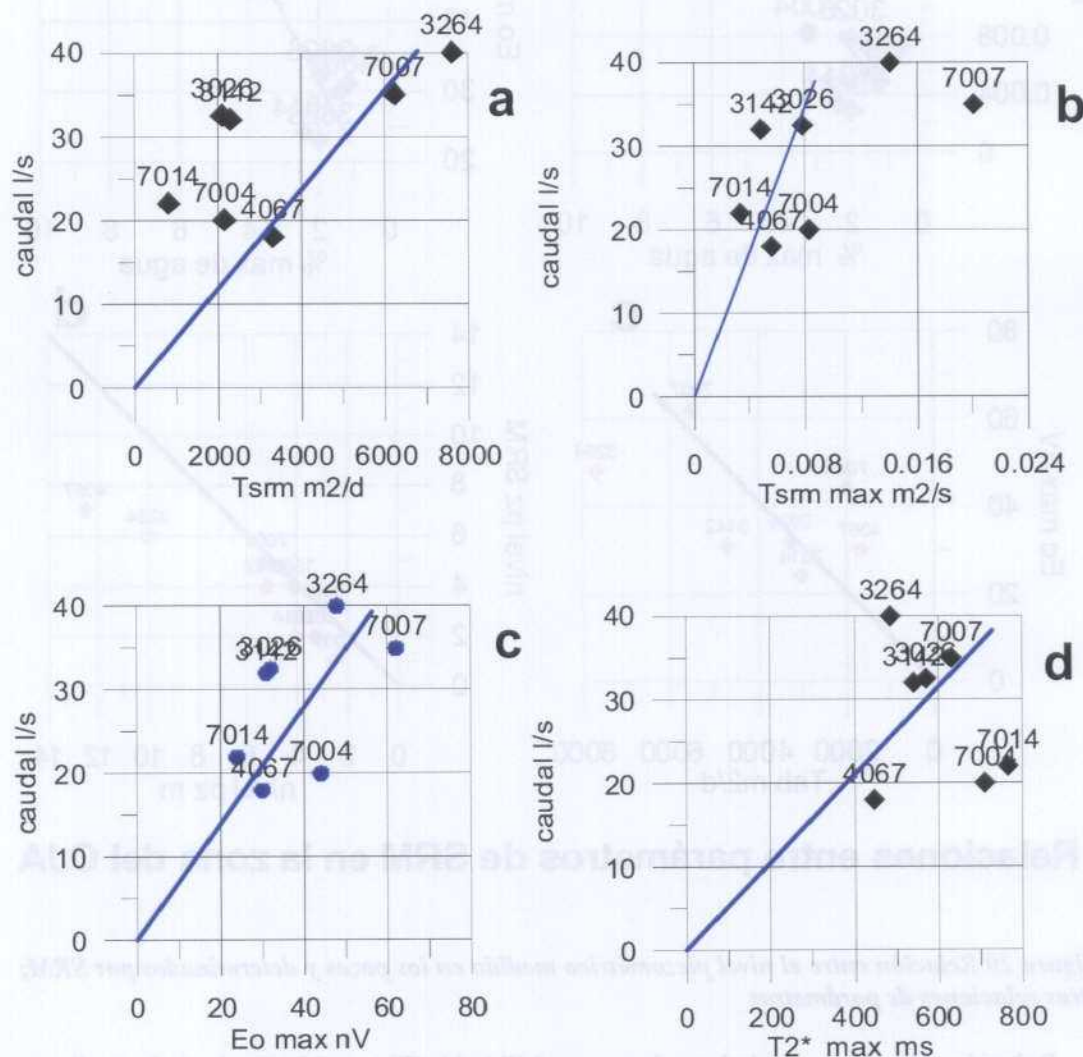
Zona	srm	npz	npz SRM	caudal l/s	Eomax	T2* max	% max	permx	Tmax	S/N
Oja	7004	5,24	5	20	44	712	3,3	8,24E-03	0,03359624	1,9
Oja	7007	2,58	1	35	62	632	5,3	0,02011809	0,06120261	1,8
Oja	3264	9,96	6	40	48	487	3,6	0,01411506	0,05638198	4,2
Oja	4067	12,5	7	18	30	449	1,4	0,005616255	0,01826443	1,5
Oja	3142	5,24	4	32	31	543	1,2	0,004824661	0,04243686	2
Oja	7014	4,09	2	22	24	768	2,4	0,003384598	0,005383195	1,1
Oja	3026	3,31	2	32,5	32	570	2	0,007855977	0,03840661	0,6
Oja	3368	4,09	4		23	431	2	0,002855808	0,009105265	1
Oja	8060	3,01	3		68	644	5,4	0,01537932	0,1555089	4

Tabla interpreOJA (parcial)

En la Figura 19 se establece la misma correlación para los valores del caudal que la efectuada en el río Jiloca, debiendo tenerse en cuenta que tanto los caudales como las transmisividades son aquí mucho más pequeñas:

- La correlación entre la transmisividad total para el tramo acuífero según los SRM y el caudal (Figura 19-a) es buena para el grupo de sondeos utilizados en el cálculo final del coeficiente de calibración, quedando más desagrupados los SRM 7014, 3062 y 3142.
- La relación entre la transmisividad máxima calculada en cada SRM y el caudal en l/s se presenta en la Figura 19b, con mejor correlación que la obtenida en el río Jiloca.

- En la Figura 19c se representan los valores máximos E_0 de señal medida en nV, frente al caudal. De nuevo es apreciable cierta correlación, lo que permite aspirar a utilizar el parámetro medido en el SRM como estimador de valores hidráulicos.
- Utilizando como estimador el valor de la constante de tiempo T_2^* (Figura 19d), sigue dándose la existencia de algunos sondeos (3264, 7004 y 7014) con amplia desviación, pero en general la correlación no es mala, y cuando menos, es mejor que la obtenida en el valle del Jiloca, posiblemente debido a la mayor uniformidad litológica de este acuífero.

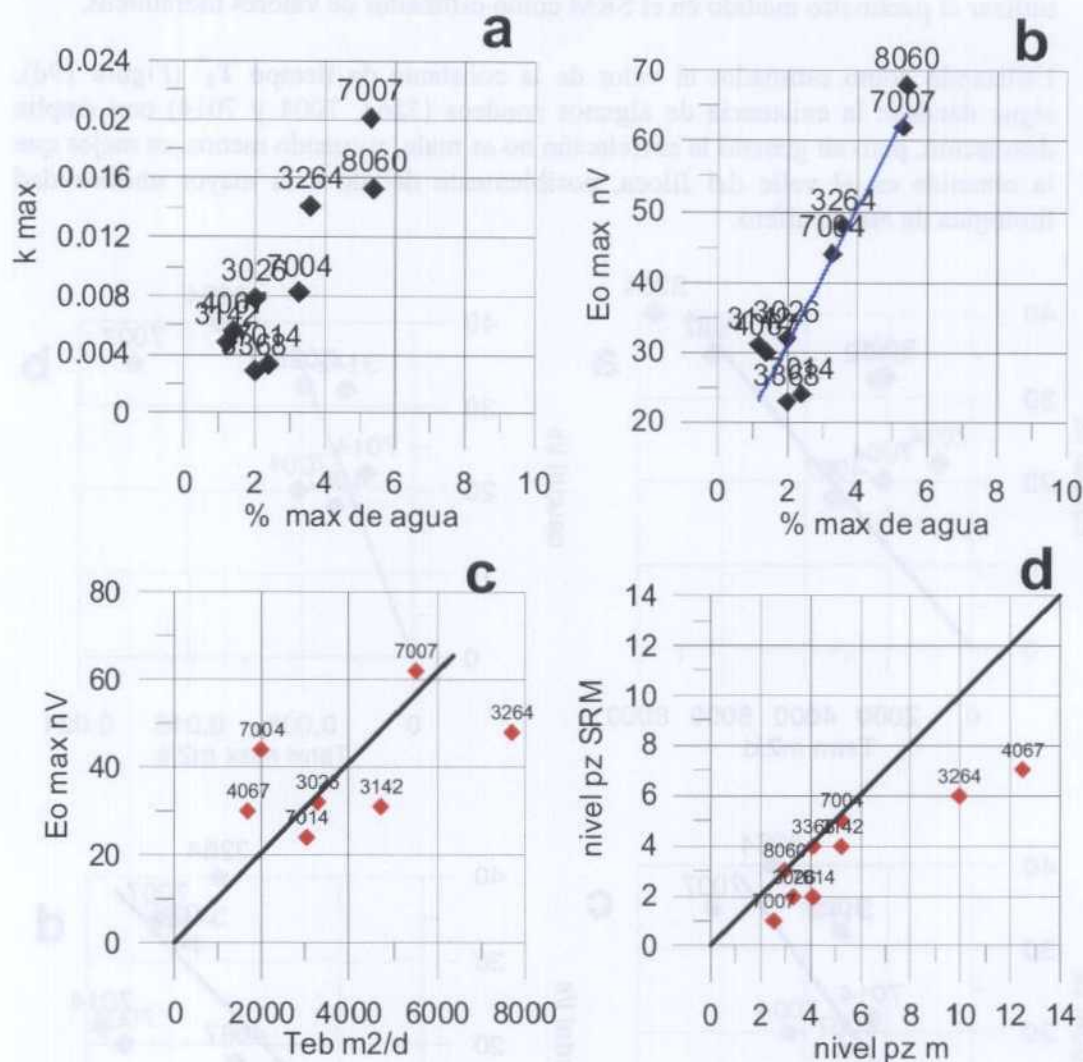


Relaciones entre el caudal y parámetros determinados por SRM en sondeos de la zona del OJA

Figura 19 Correlación entre el caudal medido en los pozos y parámetros de los SRM en la zona del río Oja

En cualquier caso, hay que tener en cuenta que los caudales aquí considerados tienen un escaso valor como estimadores de la capacidad o comportamiento de un pozo, debido a la forma en que fueron obtenidos.

Otras relaciones analizadas están representadas en la Figura 20:



Relaciones entre parámetros de SRM en la zona del OJA

Figura 20 Relación entre el nivel piezométrico medido en los pozos y determinados por SRM; otras relaciones de parámetros

- Relación entre la porosidad w y la permeabilidad k (Figura 20-a) calculada mediante la ecuación $k = C_p w T^2$ para todos los sondeos con el mismo coeficiente $C_p = 8.7E-07$. Ofrece una excelente correlación, lo que proporciona fiabilidad al coeficiente elegido, y a diferencia del río Jiloca, solo se aprecia una agrupación.
- los valores máximos de señal en nV medidos en cada SRM, frente a la máxima porosidad calculada (Figura 20b), muestran una mejor correlación que en la zona del Jiloca (obsérvese además las diferencias de escalas en ambos valles) lo que puede interpretarse como una menor disparidad de situaciones hidrogeológicas entre los emplazamientos de las mediciones (los más diferentes pueden ser los lugares 7014 y 3368).

- La relación entre los valores máximos de amplitud de señal E_0 en nV y la transmisividad suministrada por ensayos de bombeo (Figura 20c) también indica en el Oja una situación más homogénea. Se producen algunas desviaciones, incluso para lugares como el 3264, con una alta calidad de medición de SRM.
- En esta zona se dispone de suficientes valores de nivel piezométrico medido de forma simultánea a la realización de los SRM como para intentar ver su correlación con los niveles calculables a partir de la inversión de los SRM. Se presenta en la Figura 20d, de donde se deduce que los valores de SRM pueden aceptarse como una aproximación, con errores inferiores en general a 1 m para acuíferos someros, lo que es lógico, dada la potencia de las capas adoptada en la inversión (ver Figura 2). De nuevo se producen desviaciones importantes en algunos lugares (3264 y 4067), cuya razón desconocemos.

Sobre la Zona del Glera se pueden establecer las siguientes consideraciones finales:

- Se aprecia una aceptable identificación mediante SRM del acuífero ya conocido.
- Se obtiene una mayor extensión en profundidad del acuífero, lo que sería una indicación de la escasa penetración de la mayoría de las captaciones, y puede ser explicativo de la escasez de agua en estiaje.
- Se identifica la posible presencia de un segundo acuífero profundo, aunque puede ser debido a un falso efecto de los cálculos de inversión. Su existencia debería ser comprobada.
- Se ha producido una situación de aguas bajas en el acuífero durante la realización del SRM, lo que puede redundar en la escasa intensidad de la señal.
- La porosidad detectada es muy inferior a la deducida de bombeos de ensayo con piezómetros (posiblemente por la causa apuntada en el apartado anterior).
- Los resultados obtenidos son más coherentes que en el caso del Jiloca.

[página dejada intencionadamente en blanco]

11 ZONA DEL CAMPO DE CARIÑENA (JALÓN)

Aunque esta zona y la del Ebro (Cabañas) no formaban parte de los emplazamientos originariamente elegidos para este Proyecto, el equipo fue desplazado a las mismas a la vista de los resultados obtenidos hasta ese momento: tras una época prolongada de sequía, los acuíferos preseleccionados no se encontraban con el nivel de agua esperado al efectuar la planificación, por lo que se optó por verificar el comportamiento del método en zonas de mayor profundidad y/o mayor contenido de agua en esa época.

11.1 Hidrogeología de la zona

El Sistema Acuífero de Alfamén incluye el conjunto de formaciones paleozoicas, mesozoicas, terciarias y cuaternarias interrelacionadas que la componen, con independencia de que las obras de captación obtengan sus caudales de una u otra subunidad acuífera y de uno u otro estrato concreto. Los materiales que integran la unidad son variados en cuanto a naturaleza y edad geológica, incluyendo cuarcitas paleozoicas, materiales carbonatados jurásicos, niveles margosos mesozoicos, tramos detríticos terciarios y recubrimientos cuaternarios. Los únicos niveles de interés para este ensayo de SRM son los terciarios y cuaternarios.

El Terciario presenta una estructura hidrogeológica global que correspondería al siguiente esquema:

Subunidad T/A: conjunto detrítico, de comportamiento acuífero multicapa de un espesor estimado de hasta 250 m. Datos hidrogeológicos representativos según la información referida en diversos estudios realizados en la zona y del inventario de puntos de agua consultado se corresponden con unos 90 m de espesor saturado medio. La media de las transmisividades obtenidas en los ensayos reinterpretados es del 168 m²/día, y la mediana de 65 m²/día.

Subunidad T/B₁: conjunto margoso de baja permeabilidad (acuitardo), situado estrictamente en la llanura de Alfamén. Con frecuencia desconecta hidráulicamente las unidades terciaria detrítica (T/A) y Pliocuaternaria (Q).

Subunidad T/B₂: conjunto carbonatado con una permeabilidad apreciable por fisuración. Se encuentra por encima del nivel freático general, sólo localmente desarrolla pequeños acuíferos colgados poco importantes.

Subunidad T/C: de carácter acuitardo, con baja permeabilidad.

En el Cuaternario, dentro de la Subunidad Acuífera Cuaternaria (Q) se pueden distinguir dos dominios espaciales:

Área de la Foseta Virgen de Lagunas: en general constituye un buen acuífero, conocido y explotado tradicionalmente en la zona para el regadío. En el área comprendida entre la foseta y las sierras paleozoicas, a pesar del gran espesor que con frecuencia presenta la subunidad Q, cuando el nivel freático general desciende, buena parte de ella llega a quedar en todo su espesor desaturada o formando pequeños acuíferos residuales. En el área comprendida entre la foseta y el límite de

los afloramientos terciarios, la Subunidad Acuífera Q presenta muy poco espesor y apenas constituye un acuífero permanente.

El área de las terrazas del Jalón: constituidas por las formaciones aluviales que dan lugar a las terrazas bajas del Jalón, forman un acuífero detrítico de buenas propiedades hidráulicas pero de poco espesor saturado.

La Unidad Cuaternaria, si bien engloba de forma general todos los recubrimientos cuaternarios de cierta relevancia y porosidad, prácticamente se limita a las terrazas más bajas de los ríos Jalón y Huerva y, de manera especial, a un extenso y potente piedemonte adosado al borde de las sierras paleozoicas que llega a alcanzar espesores de 80 metros de potencia. Las estimaciones de transmisividad son muy variadas, se encuentran valores desde 100 hasta 1000 m²/día.

De todas las unidades acuíferas definidas, tan sólo la *Unidad Terciaria Detrítica Roja* y la *Unidad Cuaternaria (Pliocuaternario)* son mayoritariamente objeto de captación, y es en las que se han llevado a cabo las mediciones de SRM.

En síntesis, según los sondeos mecánicos utilizados en esta zona del río Jalón, se trata de un acuífero detrítico formado por gravas pliocuaternarias que van aumentando su potencia desde el norte hacia el sur (pasando de 18 m a 74 m en el área estudiada), reposando sobre un nivel de margas del Terciario, que actúa de base impermeable del acuífero, con potencia variable (25 a 70 m en la zona). Bajo estas margas, se sitúa un nuevo nivel de gravas con arcillas terciarias que puede ocasionalmente constituir un nuevo acuífero, cómo se ha puesto de evidencia en este estudio

El mapa geológico con la situación de los SRM y las columnas litológicas de los sondeos mecánicos más próximos a cada SRM quedan recogidas en los **ANEXOS VI-A y VI-C**.

11.2 Toma de datos en campo

Ha tenido lugar del 7 al 10 de octubre de 2002. La situación de los SRM efectuados está indicada en la Figura 21, y sus características son:

ZONA	FECHA	SRM	SONDEO	ht	hm	T	ANTENA	f Hz	Q	STACK	RUIDO nV	B nT	inc. B	S/R	cali
JALON	07-oct-02	P3	2616/3/242	3:45	3:30	T1	oo de 75	1915	16	160-96	1452	44982	16	1,87	MB
JALON	07-oct-02	P7	2616/3/251	4:00	3:20	T1	O de 150	1914	16	64-96	1400	44944	9	2,7	MB
JALON	08-oct-02	P4	2616/3/245	5:20	3:35	T1	O de 150	1914	13	96	3100	44954	10	2,72	R
JALON	08-oct-02	P8	2616/3/246	5:00	4:20	T1	O de 150	1915	15	68-128	6000	44972	14	1,53	B
JALON	09-oct-02	P9	2616/3/247	5:00	3:00	T1	O de 150	1915	16	64-128	3400	44992	41	0,56	MM
JALON	09-oct-02	P15	2616/3/248	2:10	1:30	T1	oo de 75	1914	16	44	400	44946	10	1,42	MM
JALON	10-oct-02	P10	2616/8/104	6:00	2:40	T1	O de 150	1915	15	64	399	44982	15	1,41	MM

Tabla srmmedicionJALON

SRM: nombre adjudicado al SRM y fichero de datos

Sondeo: nombre del sondeo mecánico más próximo

ht: tiempo total en horas empleado, incluyendo desplazamiento entre sondeos, extensión y recogida de la antena, medición de test, configuración instrumental, etc.

hm: tiempo en horas de la medición final

T: T1 indica que se ha medido con dos convertidores, por lo que puede estimarse valores de permeabilidad con el parámetro T_1

Antena: configuración del bucle utilizado como antena emisora-receptora

fHz: frecuencia de emisión, calculada por la medición del campo magnético B (nT) en cada zona ($f=0.04258 B$)

Q: número de momentos de emisión registrados

Stack: número de pulsos sumados en la medición para cada momento.

Ruido nV: nivel de ruido ambiental medido en el emplazamiento

B: intensidad media del campo magnético terrestre en el área de la antena el día de la medición en nT

Inc. B: máxima variación de B en el área de la antena

S/R: relación Señal/Ruido, obtenido tras el proceso de los datos (valor indicativo, que puede diferir según los parámetros de proceso seguido)

Cali: estimación subjetiva de la calidad final del SRM, en una escala de MB B R M MM

En el **ANEXO VI-B** se encuentran recogidas las fotografías de detalle con indicación de la posición del bucle utilizado en cada caso. Dada la mayor profundidad de investigación deseada en esta zona, se ha utilizado en casi todos los casos una antena cuadrada de 150 m de lado. El campo magnético terrestre es homogéneo, con un valor medio de 44.950 nT y variación inferior a 50 nT en toda el área prospectada; las mediciones dentro de cada emplazamiento de SRM presentan un rango de variación 9 nT a 16 nT, excepto en el SRM P9, donde llega a 41 nT.

El nivel de ruido ambiental ha sido elevado, excepto en los SRM P10 y P15, donde se ha mantenido por debajo de 500 nV (Figura 22).

Todas las mediciones se han efectuado con dos convertidores, pudiendo estimarse el tiempo T_1 . De los 7 SRM efectuados, sólo el P3 y el P7 pueden considerarse de muy buena calidad, con señal máxima por encima de los 200 nV. En los SRM P9, P10 y P15, dicho máximo está entre 30 y 80 nV.

ZONA DEL JALON

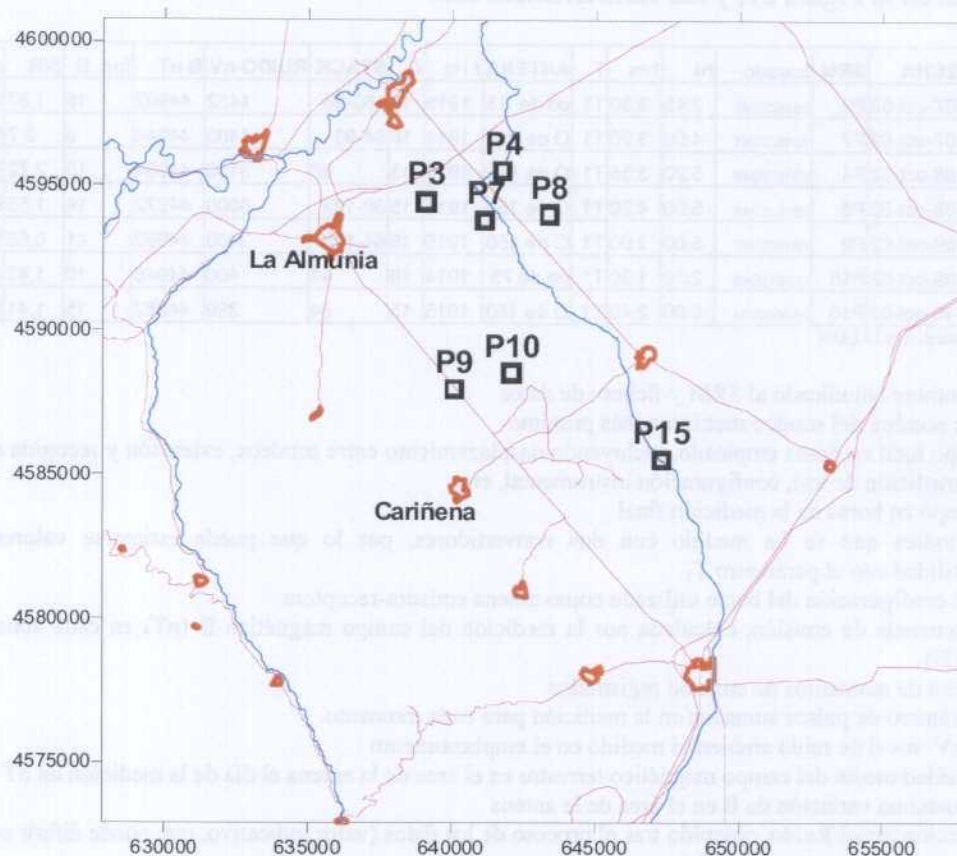
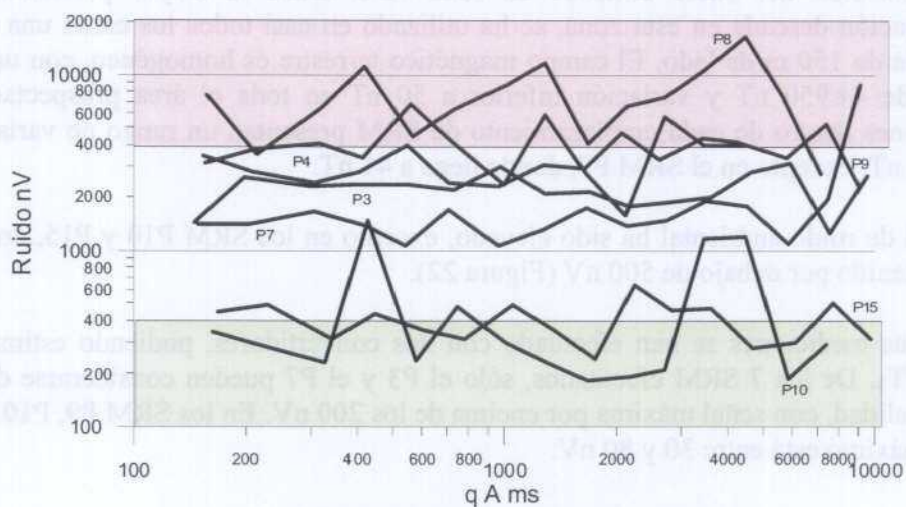


Figura 21 Posición de los SRM en la zona del Jalon. Hoja 1:50.000 n° 410. Coordenadas UTM



Ruido ambiental: Jalon

Figura 22 Ruido ambiental durante las mediciones de SRM en la zona del río Jalon.

11.3 Matriz de Inversión

Para el cálculo de la matriz de inversión se ha contado con los datos procedentes de los informes: “*Proyecto de investigación hidrogeológica en la Almunia de Doña Godina*” de marzo de 1979, archivado en el centro de documentación del IGME con el número 34022, e “*Investigación geoelectrica en la zona de Calatorao-Alfamen-Almonacid de la Sierra (Zaragoza)*” de enero de 1987, con el número 34062. La interpretación efectuada en estos informes se ha tomado como referencia para elaborar el modelo de distribución de resistividad. Para los SEV próximos a los sondeos mecánicos en donde se han realizado las medidas de SRM el modelo geoelectrico es:

Sondeo	nºinventario	Ohm.m	Potencia
P3	2616/3/242	287	27
		42	190
P4	2616/3/251	75	10
		21	79
		79	
P7	2616/3/245	108	8
		40	329
P8	2616/3/246	150	25
		26	70
		59	279
P9	2616/3/248	167	7
		78	19
		221	10
		60	72
			189
P10	2616/3/248	161	18
		72	298
P15	2616/8/104	157	25
		34	206

Obteniéndose el siguiente modelo general de la zona:

φ (Ω m)	E (m)
150	20
40	

En el sondeo P9 la segunda capa tiene un carácter más resistivo y en el P8 un poco más conductor. La matriz se ha calculado para las antenas empleadas en las medidas de SRM que son:

Bucle en ocho de 75 m de lado → matriz = 875jalon.mrm

Bucle cuadrado de 150 m de lado → matriz = 150jalon.mrm

utilizando en todos los casos una inclinación del campo magnético de 55° y frecuencia de resonancia de 1915 Hz.

11.4 Interpretación

El nivel de ruido en esta zona es elevado, situándose por encima de los 3000 nV para la mayoría de los emplazamientos (Fig. 22), siendo mejores las condiciones en la parte Sur (entorno de Alfamén) que en la Norte (entorno de La Almunia); sin embargo, la relación señal/ruido alcanzada ha sido mejor en el norte (entre 2 y 4), debido a la mayor amplitud de la señal (160-400 nV), que en Alfamén (S/R entre 0.8-1.4 y señal máxima de 40-60 nV). La tabla siguiente sintetiza los parámetros de proceso aplicados:

proceso de datos de SRM zona del JALON						
SRM	r.a.f. time conts. ms	S/R	error ajuste %	p.regularización.	cpx	observaciones.
P3	15	4,2	2,1	206	2,30E-09	notch wide
P4	15	3	7,6	3143	2,30E-09	notch wide
P7	15	3,5	2,5	762	2,30E-09	notch wide
P8	15	2	1,7	1159	2,30E-09	notch wide
P9	15	0,7	8,2	1129	2,30E-09	notch wide
P10	15	1,3	11,4	3906	2,30E-09	
P15	15	1,4	6,4	396	2,30E-09	notch wide

TablaProcesoJALON

Se ha considerado necesario aplicar un filtro notch a casi todas las mediciones; se hace notar que la relación S/R aquí constatada es mejor que la obtenida con los datos brutos, que es la indicada en la tabla del apartado 11.2. Los ficheros con los datos de campo, procesados y resultado de la inversión se encuentran en el **ANEXO VI-E**.

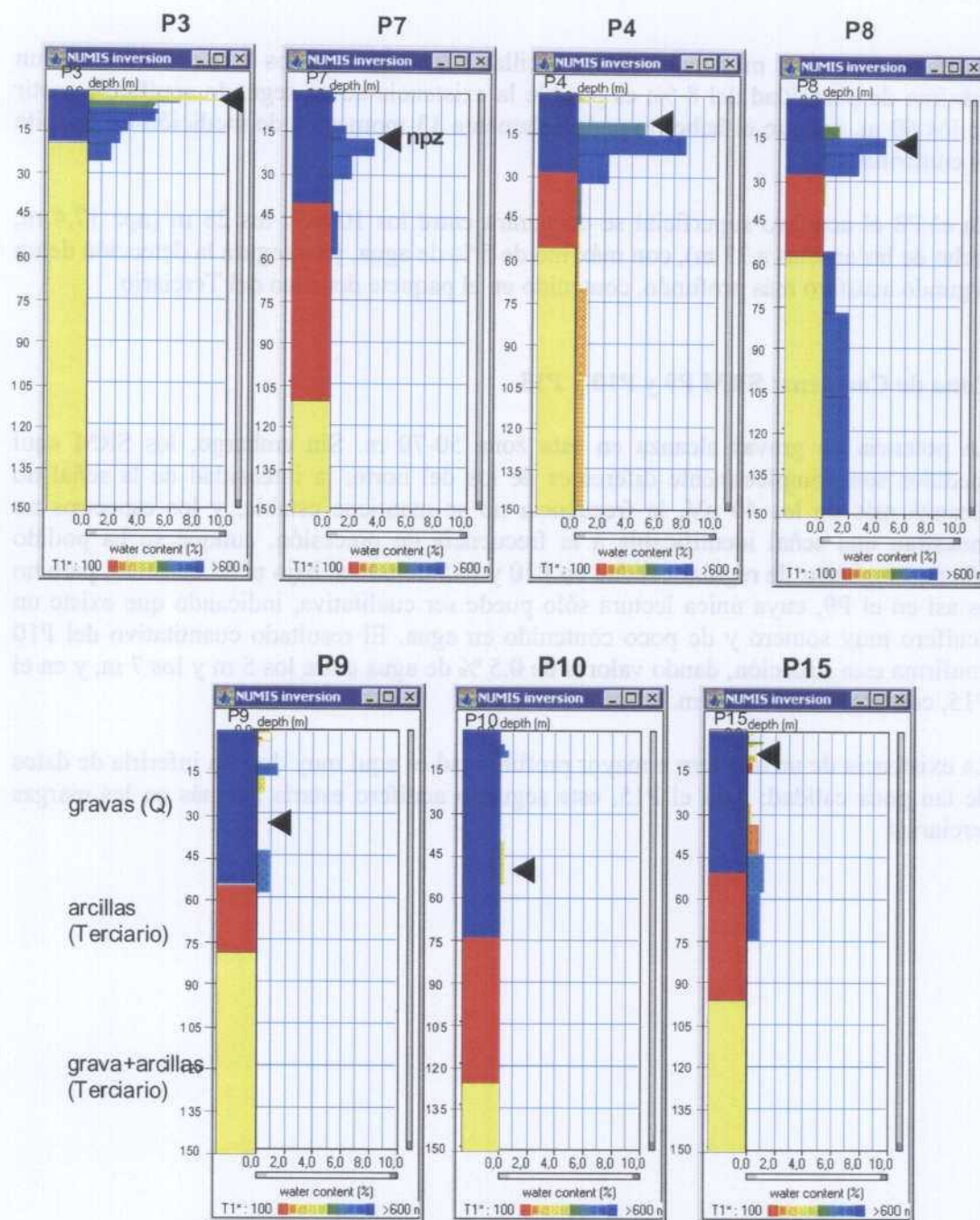
Los resultados gráficos de la inversión, junto con las curvas de campo (gráficos **E(t)**, **E_o(q)**, **Namb(q)**, **T₂^{*}(q)**, **f(q)**, **fase(q)** y **w(q)**) se reproducen en las figuras del **ANEXO VI-D**. En este capítulo se muestran sólo los resultados de la distribución de agua con la profundidad y valores de la constante de tiempo T₁, junto con la columna litológica facilitada de los sondeos mecánicos más próximos a cada SRM. La descripción (Figura 23) se hará formando dos perfiles:

Zona de La Almunia: SRM P3, P4, P7 y P8

Las curvas E(t) de los SRM obtenidas en esta zona son de buena calidad, con relaciones S/R entre 2 y 4, buen mantenimiento de la frecuencia y presentado espectros en los que se manifiesta la presencia de frecuencias de resonancia, aunque también existe contaminación electromagnética de 50 Hz. Los resultados de la inversión pueden verse en la Figuras 23, y están representados de forma conjunta, ordenados según un perfil Oeste-Este.

En todos los SRM se refleja la presencia de un acuífero en las gravas pliocuaternarias, cuyo techo y muro, en la solución encontrada por la inversión de los datos es muy conforme tanto con los niveles piezométricos medidos el mismo día de la realización de los SRM, como con la potencia de gravas en los diferentes emplazamientos. Los valores de la constante de decaimiento se corresponden con materiales de grano grueso.

En el P3 el acuífero aparece entre 2-3 m (npz 2.79 m) y se extiende hasta los 26 m (potencia de gravas 18 m), con un contenido máximo del 5% de agua.



Resultados de los SRM en la zona del río Jalón
Perfil Norte (Almunia) P3-P8 Perfil Sur (Cariñena) P9-P15

Figura 23 Perfiles de interpretación del contenido en agua y de T_1 (tamaño del grano) de los SRM medidos en la zona del Jalón, con indicación de las columnas litológicas de los pozos más próximos. Los colores adjudicados a la litología se han elegido en correspondencia con el valor de la constante de tiempo, según se indica en el párrafo 3.4. Se indica el npz medido.

En el P7, entre los 17 m y los 31 m (npz 17.3 m, techo de las arcillas a 40 m) hay hasta un 3% de agua, pudiendo existir un acuífero inferior, entorno a los 50 m y con menos del 1% de agua.

En el P4 (npz 12.8 m y techo de las arcillas a 27 m), entre los 9 m y 31 m hay un máximo de porosidad del 8 %; es posible la existencia de un segundo acuífero a partir de los 60 m, aunque el haber tomado solamente 13 momentos de medición no permite su confirmación.

En el P8 el acuífero superficial se encuentra entre los 10 m y los 28 m (npz 17.4 m, techo de las arcillas a 27 m), con máximo de 5 % de agua, y es segura la detección de un segundo acuífero más profundo, contenido en el paquete detrítico del Terciario.

Zona de Cariñena: SRM P9 y P10 y P15

La potencia de gravas alcanza en esta zona 50-70 m. Sin embargo, los SRM aquí medidos son completamente diferentes de los del norte: la intensidad de la señal no alcanza más de los 40 nV, la frecuencia no se mantiene estable, y los espectros no muestran una señal identificable a la frecuencia de precesión, aunque se ha podido efectuar registros de regular calidad en P10 y P15 debido al bajo nivel de ruido, pero no es así en el P9, cuya única lectura sólo puede ser cualitativa, indicando que existe un acuífero muy somero y de poco contenido en agua. El resultado cuantitativo del P10 confirma esta situación, dando valores de 0.5 % de agua entre los 5 m y los 7 m, y en el P15, con un 2 % a los 7-8 m.

La existencia de un acuífero a mayor profundidad es aquí muy dudosa inferirla de datos de tan poca calidad; para el P15, este segundo acuífero estaría además en las margas terciarias

11.5 Determinación de parámetros hidrodinámicos

11.5.1 Datos de partida

En esta zona no ha sido posible encontrar información de ensayos de bombeo en las inmediaciones de los lugares donde se han realizado los SRM. En el siguiente cuadro se sintetiza la información facilitada por la oficina de IGME en Zaragoza (diciembre 2003), sobre datos bastante alejados de los puntos de medición (distancia al bucle):

Ensayo SRM	Sondeo	Distancia Bucle (m)	Profund. m	Acuíferos			Rejilla		Transmisividad (m ² /día) Adoptada	Coef. Alm.
				Desde	Hasta	Acuíferos y/o litología favorable	Desde	Hasta		
P-3	2616-3339	2195	105	?	?	?	?	?	780	1 a 8 x 10 ⁻³
P-7		1381								
P-4	2616-4126	2441	125	?	?	?	?	?	42	1 a 8 x 10 ⁻³
P-8	2616-4126	1074	125	?	?	?	?	?	42	2 a 8 x 10 ⁻³
	2616-4127	1596	125,6	?	?	?	?	?	260	2 a 8 x 10 ⁻³
				54	94	Gravas con arcillas	12	14		
	2616-4128	1612	150	117	124	Conglomerados silíceos (NO)	36	171	10	2 a 8 x 10 ⁻³
				124	170	Conglomerados con arcillas (NO)				
	2616-4046	1845	150	Primer acuífero en gravas a los 50 m (pobre)			80	150	40	2 a 8 x 10 ⁻³
				Segundo acuífero en gravas a los 110 m (NO)						
P-10	2616-3280	1818	140	20	60	Gravas con arcillas	20	40	30	2 a 8 x 10 ⁻³
				no coincide litología con situación de rejillas			60	80		
							105	125		
	2616-3327	2383	200	135	200	Gravas, arenas y arcillas (NO)	135	200	13	2 a 8 x 10 ⁻³
				5	17	Gravas	17	27		
P-15	2616-4119	2688	105	164	167	Gravas con arcillas(NO)	40	44	200	2 a 8 x 10 ⁻³
				167	175	Gravas, arenas, arcillas(NO)	93	121		
				190	201	Gravas, arenas, arcillas(NO)	167	190		
							191	201		
P-15	2616-8185	683	99	91	99	Gravas(NO)	87	98	450	2 a 8 x 10 ⁻³
				49	70	Gravas	33	46		
	2616-8197	1214	192	115	186	Alternancia conglomerados y arcillas(NO)	61	70	140	2 a 8 x 10 ⁻³
							115	186		
				36	53	Arenas y Gravass	40	80		
	2616-8193	1246	149	53	62	Arcillas, arenas y gravas	119	149	65	2 a 8 x 10 ⁻³
				62	74	Gravas				
				135	149	Gravas lavadas(NO)				
	2616-8195	1741	173	23	49	Gravas	35	49	110	2 a 8 x 10 ⁻³
				53	60	Arenas	51	69		
				62	66	Arenas	128	164		
				131	139	Conglomerados (NO)				
				141	159	Gravas (NO)				
				161	173	Gravas (NO)				

En la tabla anterior se señala con (NO) aquellos valores que no pueden ser considerados, ya que están fuera de la profundidad de investigación alcanzable con el método. Para el resto, se han promediado los valores de transmisividad, aunque en

algunos casos puede provenir de acuíferos más profundos que los prospectados por SRM. Se van a utilizar por lo tanto los siguientes valores:

srn	n°inventario	toponimia	x	y	z	prof	caudal l/s	Transmi.m2/dia	n.pz.
P3	2616/3/242	DGA Cuesta la Nava	639084	4594475	361,5	208		780	2,79
P4	2616/3/251	El Ceicazo	641760	4595556	369,5	235		42	12,86
P7	2616/3/245	El Saso	641147	4593838	376	237		780	17,34
P8	2616/3/246	La Jupe	643386	4594044	348,4	200		10-260	17,14
P9	2616/3/247	El Mediano	640088	4587973	455,6	252			32,09
P10	2616/3/248	Las Matas	642079	4588540	442,4	200		30	51,29
P15	2616/8/104	Casa Pardina	647311	4585509	491,3	200		65-140	11,36

Tabla srnhidrauJALON

11.5.2 Calibración para la zona del Jalón

Debido a la distancia entre estos lugares y los emplazamientos de las mediciones, así como a la profundidad de los acuíferos respecto de la profundidad de investigación de los SRM, los valores de transmisividad deben ser tomados con todas las reservas a la hora de ser cruzados con los parámetros determinados por SRM para el cálculo de los coeficientes de calibración. Los niveles piezométricos fueron tomados en el momento de las mediciones y en los sondeos indicados, junto a los SRM.

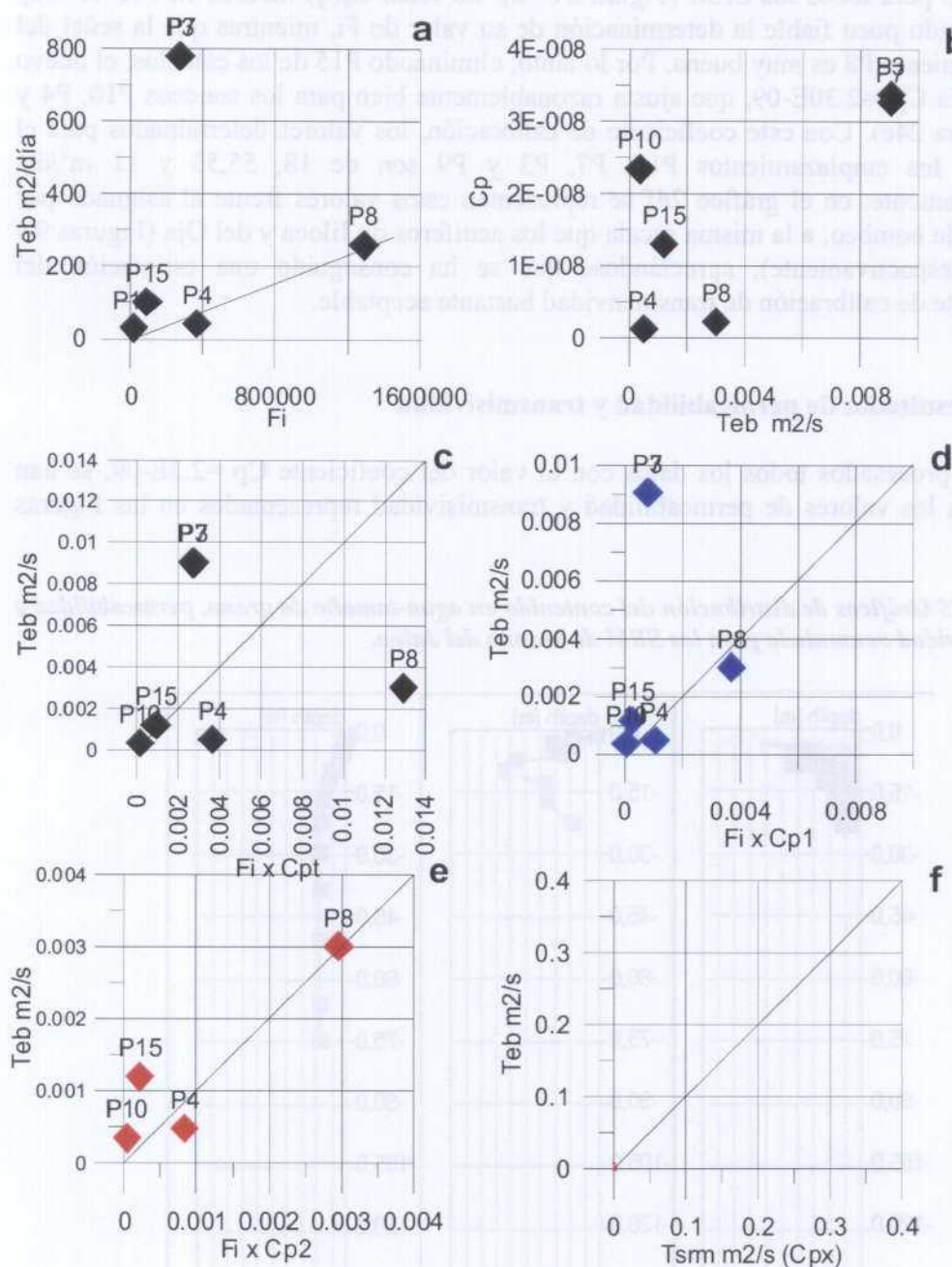
Siguiendo el mismo procedimiento de los acuíferos anteriormente expuestos en este Informe, se ha llegado a establecer los siguientes valores de coeficientes de calibración: (los ficheros de cálculo se encuentran recogidos en el **ANEXO VI-E**):

zona	srn	Teb m2/dia	Teb m2/s	Fi	intervalo z	Fi x Cpt	Cp	Fi x Cp1	Fi x Cp2	Tsrn m2/d (Cp2)
Jalon	P4	42	4,86E-04	365702	2-3,10-32,70-150	3,66E-03	1,33E-09	1,04E-03	8,41E-04	72,67
Jalon	P8	260	3,01E-03	1290180	10-29,55-150	1,29E-02	2,33E-09	3,68E-03	2,97E-03	256,38
Jalon	P10	30	3,47E-04	14856	5-10,40-55	1,49E-04	2,34E-08	4,24E-05	3,42E-05	2,95
Jalon	P15	103	1,19E-03	92188	4-6,9-12,34-75	9,23E-04	1,29E-08	2,63E-04	2,12E-04	18,32
Jalon	P7	780	9,03E-03	276120	0-1,12-32,43-59	2,76E-03	3,27E-08	7,89E-04	6,35E-04	54,87
Jalon	P3	780	9,03E-03	267257	1-26	2,68E-03	3,38E-08	7,63E-04	6,15E-04	53,11
Jalon	P9			56046	0-2,12-17,43-59	5,61E-04		1,60E-04	1,29E-04	11,14
		suma Teb	suma Fi			Cp				
		2,31E-02	2306303	Cpt		1,00E-08				
		5,03E-03	1762926	Cp1 sin 3,7		2,86E-09				
		3,84E-03	1670738	Cp2 sin 3,7,15		2,30E-09				

Tabla interpreJALON (parcial)

No se han eliminado los tramos más profundos del P4 y del P8 para tener en cuenta su posible influencia en los valores de la transmisividad T_{eb} suministrados. En la Figura 24-a se representan los valores de transmisividad sin calibrar F_i frente los determinados mediante ensayos de bombeo T_{eb} en m²/día. La comparación con las zonas del Jiloca y del Oja debe hacerse teniendo en cuenta que los valores de transmisividad son aquí muy inferiores. Para expresar mejor la variación de los coeficientes de calibración que surgirían como resultado de aplicar el cociente $C_p = T_{eb}/F_i$ a cada SRM por separado, la relación T_{eb} y C_p se representa en la Figura 24-b. Es evidente que los valores de

transmisividad adjudicados a los emplazamientos P3 y P7 de 780 m²/día no se corresponden con el orden de magnitud medido en los SRM, por lo que deben provenir de otro tipo de litología o de acuíferos más profundos, no alcanzados por las mediciones de SRM, y por tanto no pueden ser tenidos en cuenta, a pesar de que estos SRM son de muy buena calidad.



Calibración de la Transmisividad para los SRM del Jalón

Cpt=1.00E-08; Cp1=2.86E-09 (sin 3,7); Cp2=2.30E-09 (sin 3,7,15)

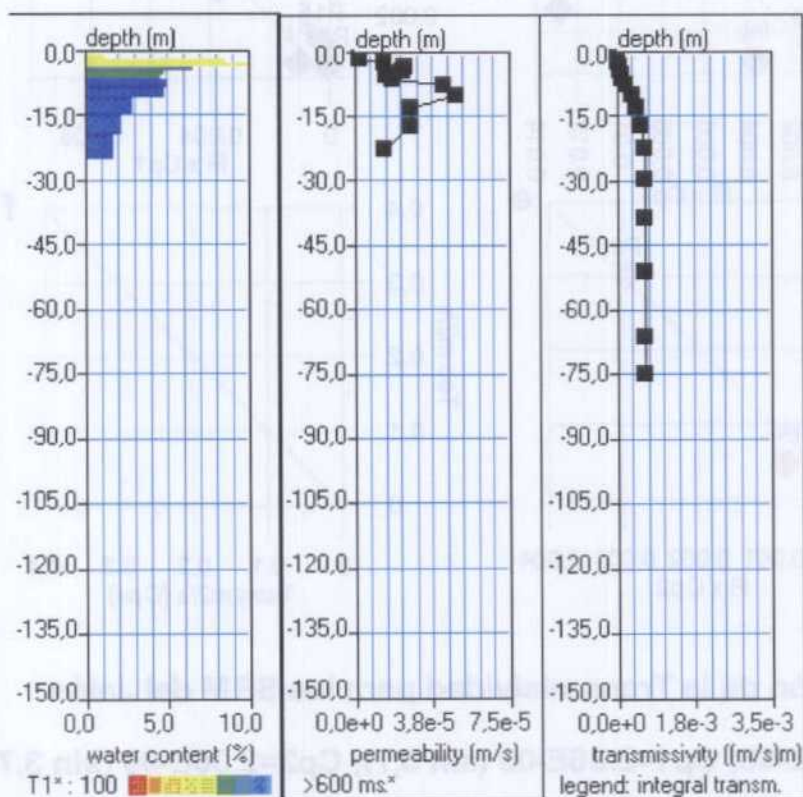
Figura 24 Calibración de la Transmisividad en la zona del Jalón

Para el conjunto de mediciones, se obtiene un coeficiente de calibración de $C_{pt} = 1.00E-08$, que aplicado a todos los sondeos (gráfico 24-c) muestra claramente que además de que los valores asignados a los P3 y P7 no pueden ser utilizados, este coeficiente no se ajusta al conjunto del resto. Por lo tanto, eliminando dichos puntos, el nuevo factor de calibración obtenido es $C_{p1} = 2.86 E-09$, que no muestra buena alineación para todos los SRM (Figura 24 -d). La señal $E_0(q)$ medida en P15 es muy débil, siendo poco fiable la determinación de su valor de F_i , mientras que la señal del emplazamiento P8 es muy buena. Por lo tanto, eliminando P15 de los cálculos, el nuevo valor sería $C_{p2}=2.30E-09$, que ajusta razonablemente bien para los sondeos P10, P4 y P8 (Figura 24e). Con este coeficiente de calibración, los valores determinados para el resto de los emplazamientos P15, P7, P3 y P9 son de 18, 55,53 y 11 $m^2/día$ respectivamente; en el gráfico 24f se representan estos valores frente al asignado por ensayos de bombeo, a la misma escala que los acuíferos de Jiloca y del Oja (Figuras 9-f y 17-f respectivamente), apreciándose que se ha conseguido una estimación del coeficiente de calibración de transmisividad bastante aceptable.

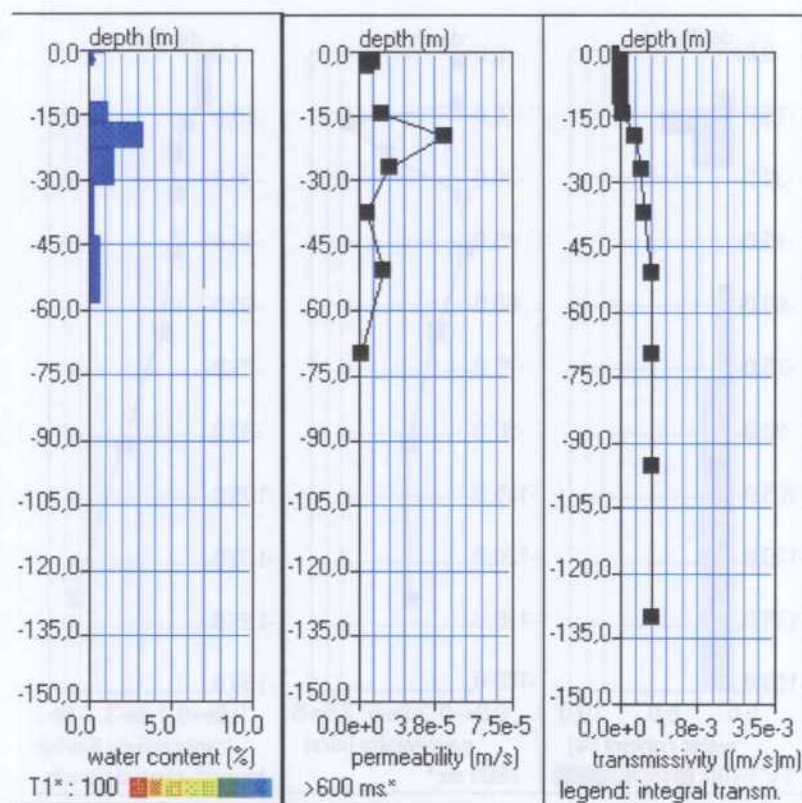
11.5.3 Resultados de permeabilidad y transmisividad

Una vez procesados todos los datos con el valor del coeficiente $C_p = 2.3E-09$, se han obtenidos los valores de permeabilidad y transmisividad representados en las Figuras 25.

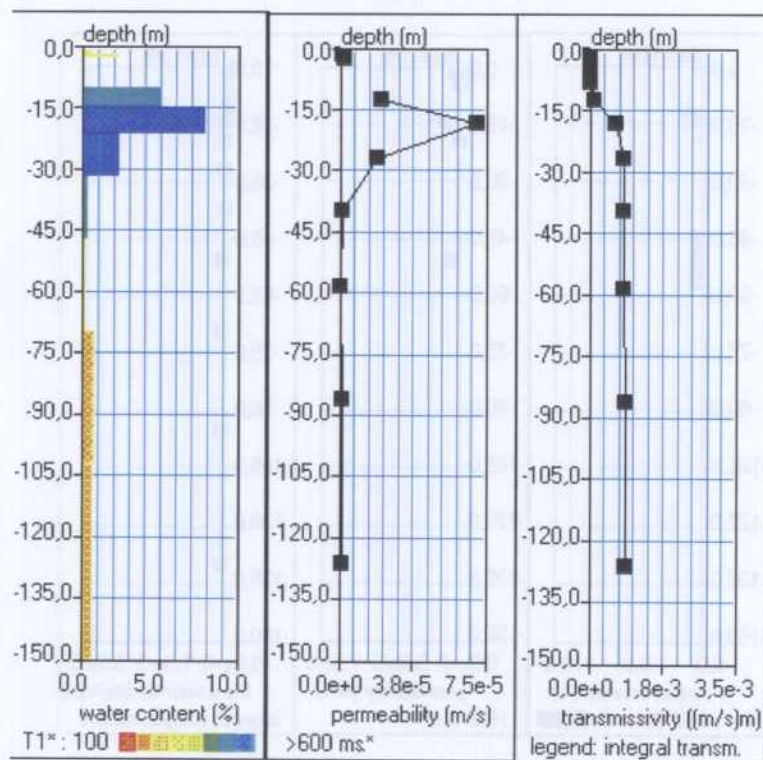
Figuras 25 Gráficos de distribución del contenido en agua-tamaño de grano, permeabilidad y transmisividad acumulada para los SRM de la zona del Jalón.



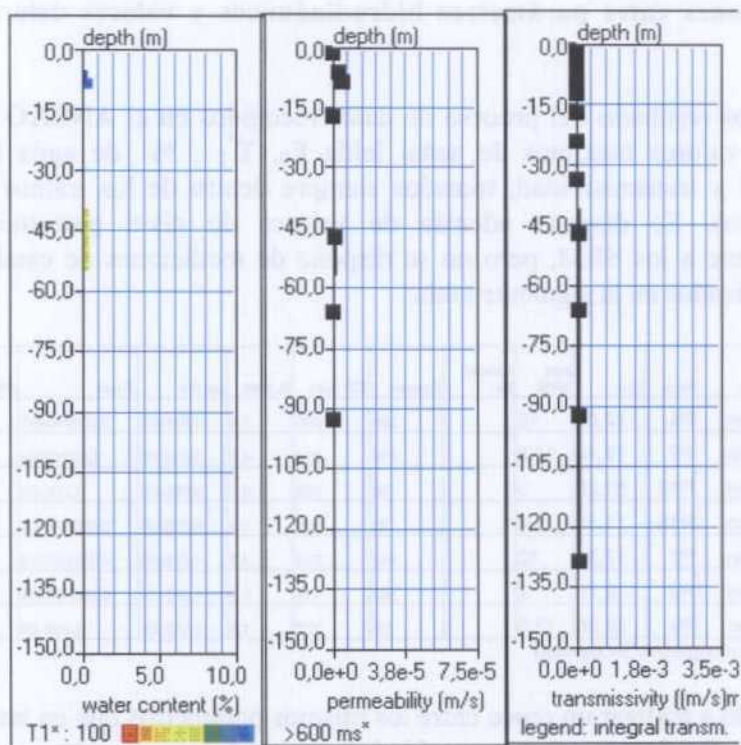
P3



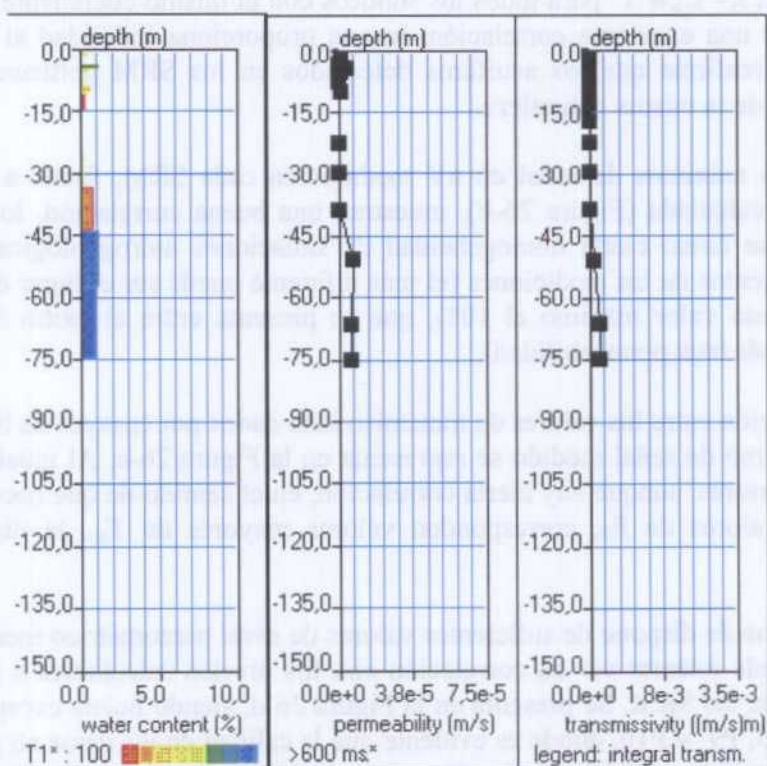
P7



P4



P10



P15

11.5.4 Relaciones entre parámetros hidrodinámicos y valores determinados por SRM

De los ficheros resultado del proceso de datos recogidos en el ANEXO VI-E, se han obtenido los valores máximos de señal leída E_0 , T_2^* , % de agua (extrapolado), permeabilidad y transmisividad, tomados siempre dentro de los tramos interpretados como acuíferos. Se dispone además de valores de nivel piezométrico medido simultáneamente a los SRM, pero no se dispone de mediciones de caudal. Con estos valores, sintetizados en la siguiente tabla:

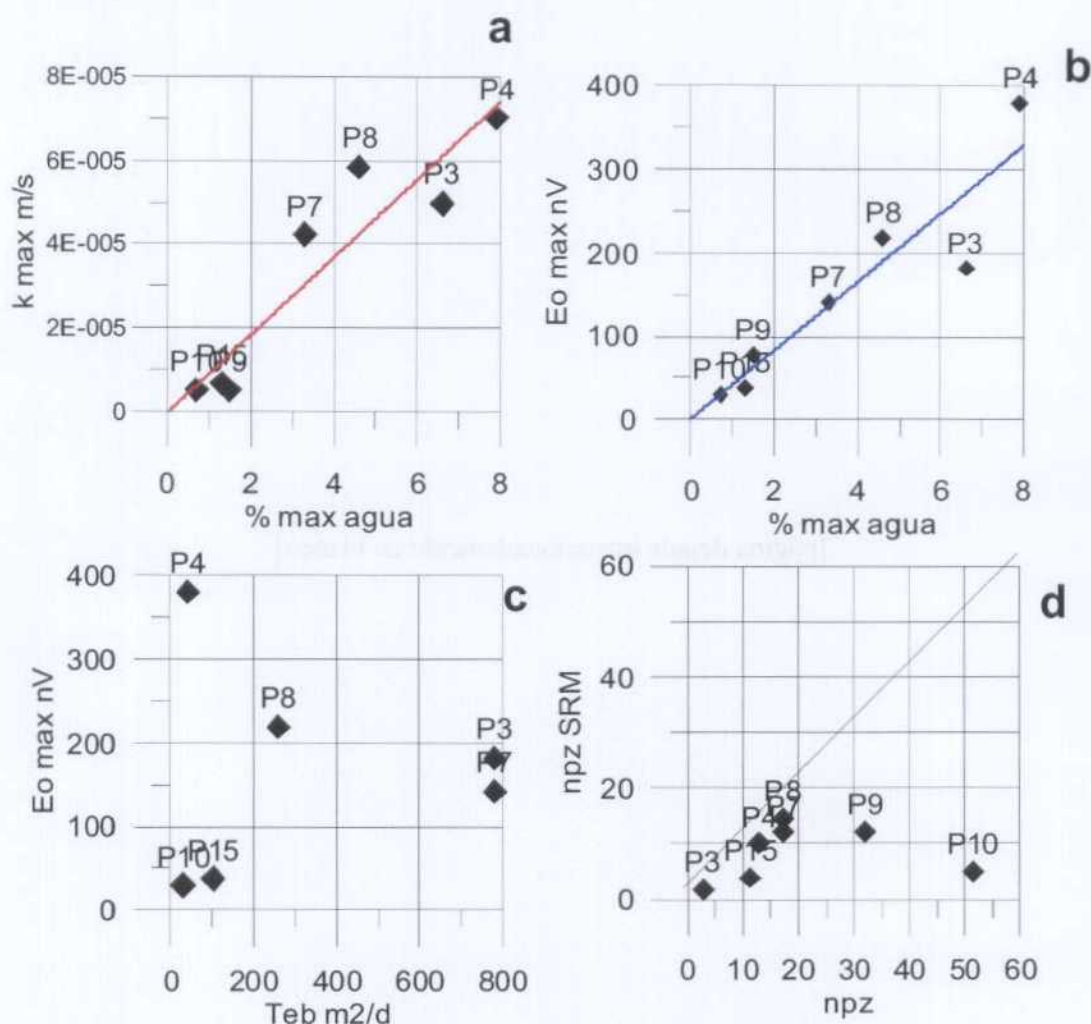
Zona	srn	npz	npz SRM	caudal l/s	Eomax	T2* max	% max	permx	Tmax	S/R
Jalon	P4	12,86	10		380	299	7,9	7,03E-05	0,000493663	3
Jalon	P8	17,14	14,5		219	224	4,6	5,83E-05	0,00112984	2
Jalon	P10	51,29	5		30	282	0,7	5,09E-06	1,50E-05	1,3
Jalon	P15	11,36	4		38	341	1,3	6,78E-06	0,000106404	1,4
Jalon	P7	17,34	12		142	276	3,3	4,23E-05	0,000262083	3,5
Jalon	P3	2,79	2		182	135	6,6	4,98E-05	0,000134939	4,2
Jalon	P9	32,09	12,3		78	727	1,5	5,18E-06	8,22E-05	0,8

Tabla interpreJALON (parcial)

se ha procedido a realizar un cruce entre los mismos parámetros que en las zonas del río Jiloca y Oja, a fin de estimar su capacidad de estimadores, así como su utilidad en el análisis de la información. Estas correlaciones están representadas en la Figura 26.

- Relación entre la porosidad w y la permeabilidad k (Figura 26a) calculada mediante la ecuación $k = C_p w T^2$ para todos los sondeos con el mismo coeficiente $C_p = 2.30E-09$. Ofrece una excelente correlación, lo que proporciona fiabilidad al coeficiente elegido y reafirma que los acuíferos detectados en los SRM pertenecen todos a materiales de la misma naturaleza.
- los valores máximos de señal en nV medidos en cada SRM, frente a la máxima porosidad calculada (Figura 26-b), muestran una buena correlación, lo que puede interpretarse como cierta homogeneidad de situaciones hidrogeológicas entre los emplazamientos de las mediciones (el más diferente puede ser el lugar del P3, si se tomara como valor máximo el 10%, que se presenta entre el metro 3 y 4, para materiales de baja permeabilidad).
- La correlación entre los valores de transmisividad dados por ensayos de bombeo y el valor máximo de señal medido se representa en la Figura 26-c. Al igual que en las zonas anteriores, aunque hay cierta correlación, en el sentido de que normalmente a mayores valores de E_0 , corresponden valores mayores de T_{eb} , la dispersión es grande.
- En esta zona se dispone de suficientes valores de nivel piezométrico medido, por lo que se puede intentar ver su correlación con los niveles calculables a partir de la inversión de los SRM. Se presenta en la Figura 26-d, siendo buena excepto para los lugares P15, P9 y P10, donde es evidente que la calidad de los datos no permite dar fiabilidad a la inversión, y además corresponden a una zona donde los niveles piezométricos suelen ser más profundos, mientras que en los emplazamientos P3,

P4, P7 y P8, la evolución descendente no es tan acusada y los niveles más superficiales no se han desecado totalmente.



Relación entre parámetros determinados por SRM, y entre estos y los medidos en los pozos en la zona del JALON

Figura 26 Relación entre parámetros de SRM. Correlación del nivel piezométrico medido y estimado por SRM.

En síntesis, en esta zona del río Jalón, el acuífero detrítico formado por gravas del Pliocuatrnario resulta bien identificado en los SRM, sobre todo en la zona norte, donde la calidad de los datos obtenidos es buena a pesar del alto nivel de ruido. En el P8 se detecta además un segundo acuífero más profundo, contenido en el paquete detrítico del Terciario. A pesar de que la información sobre transmisividades proviene fundamentalmente de acuíferos más profundos, ha podido determinarse un coeficiente de calibración válido para obtención de este parámetro hidráulico a partir de mediciones de SRM.

12 ZONA DEL ALUVIAL DEL RÍO EBRO (CABAÑAS)

12.1 Hidrología de la Zona

Ocupa el aluvial del río Ebro desde el estrechamiento de Tudela hasta la reducción en la zona meandriforme de Sástago, así como los del Queiles y Huecha en su parte baja, el Jalón (aguas abajo de Rueda de Jalón), el del Huerva (a partir de Muel), y el del Arba en su parte final. Comprende parte de las comunidades autónomas de Aragón y Navarra

La mayor explotación del acuífero aluvial se realiza con pozos que tienen una profundidad media de 14 metros. El uso al que se destinan estos aprovechamientos es variado: abastecimiento urbano, ya sea total, complementariamente o como infraestructuras para mejorar la garantía en casos de sequía; abastecimiento en las industrias e instalaciones ganaderas o regadíos de pequeña entidad.

Según datos del Plan Hidrológico de la cuenca del Ebro 1998, los recursos se estiman en 337 hm³/año y las extracciones en 72 hm³/año.

Los diversos niveles de terrazas constituyen un extenso acuífero libre constituido por gravas englobadas en matriz limo-arcillosa. Este nivel acuífero se sitúa sobre los depósitos margo-yesíferos del mioceno. La geometría del paquete detrítico es variable debido a la existencia de surcos y umbrales en el substrato, lo que condiciona la existencia de zonas en las que el espesor saturado es superior a 20 m y otras en las que éste se reduce a una delgada lámina inferior a los 10 m. En el entorno de Cabañas de Ebro el espesor del acuífero queda reducido a 9 m, de los cuales escasamente 7 m estarían bajo el nivel saturado.

Los parámetros hidrogeológicos para la totalidad del acuífero arrojan valores muy dispares debido por un lado a las variaciones de potencia y por otro a las características litológicas de las gravas (contenido en finos y tamaño de grano). Respecto a la permeabilidad se cifra como valor medio más representativo para la mayor parte del acuífero 500 m/día: la transmisividad varía entre 100 y 10.000 m²/día. Los caudales específicos oscilan entre 5 y 50 l/s por metro de descenso, según las zonas y finalmente la porosidad eficaz puede ser valorada, en principio y a nivel más bien estimativo, en un 10 %.

La zona elegida para los sondeos SRM se sitúa en la proximidad de la población de Cabañas debido a que este sector fue estudiado con más detalle por el IGME para el posible abastecimiento a la factoría de General Motors. En esta zona el acuífero está formado por un paquete de gravas, de hasta 9 metros de espesor, con alguna leve intercalación de arcillas, cuyo substrato impermeable está constituido por yesos situados a una profundidad variable entre 8 y 13 metros, según las zonas. Las trasmisividades obtenidas oscilan entre 1.770 y 2.300 m²/día, y el coeficiente de almacenamiento entre el 1% y 5%.

El mapa geológico de la zona donde se han llevado a cabo las mediciones de SRM queda recogido en el ANEXO VII-A, y las columnas litológicas de los sondeos mecánicos más próximos, en el ANEXO VII-C.

12.2 Toma de datos en campo

Ha tenido lugar del 7 al 10 de octubre de 2002. Los SRM efectuados son:

ZONA	FECHA	SRM	SONDEO	Ht	hm	T	ANTENA	f Hz	Q	STACK	RUIDO nV	B nT	inc. B	S/R	cali
ebro	10-oct-02	ca1032	2714/1/32	2:40	2:10	T1	oo de 50	1921	16	64	4400	45123	70	0,7	M
ebro	11-oct-02	ca1034	2714/1/34	5:00	3:50	T1	oo de 50	1922	16	128	7000	45128	20	0,73	MM

Tabla srmmedicionEBRO

SRM: nombre adjudicado al SRM y fichero de datos

Sondeo: nombre del sondeo mecánico más próximo

ht: tiempo total en horas empleado, incluyendo desplazamiento entre sondeos, extensión y recogida de la antena, medición de test, configuración instrumental, etc.

hm: tiempo en horas de la medición final

T: T1 indica que se ha medido con dos convertidores, por lo que puede estimarse valores de permeabilidad con el parámetro T_1

Antena: configuración del bucle utilizado como antena emisora-receptora

fHz: frecuencia de emisión, calculada por la medición del campo magnético B (nT) en cada zona ($f=0.04258 B$)

Q: número de momentos de emisión registrados

Stack: número de pulsos sumados en la medición para cada momento.

Ruido nV: nivel de ruido ambiental medido en el emplazamiento

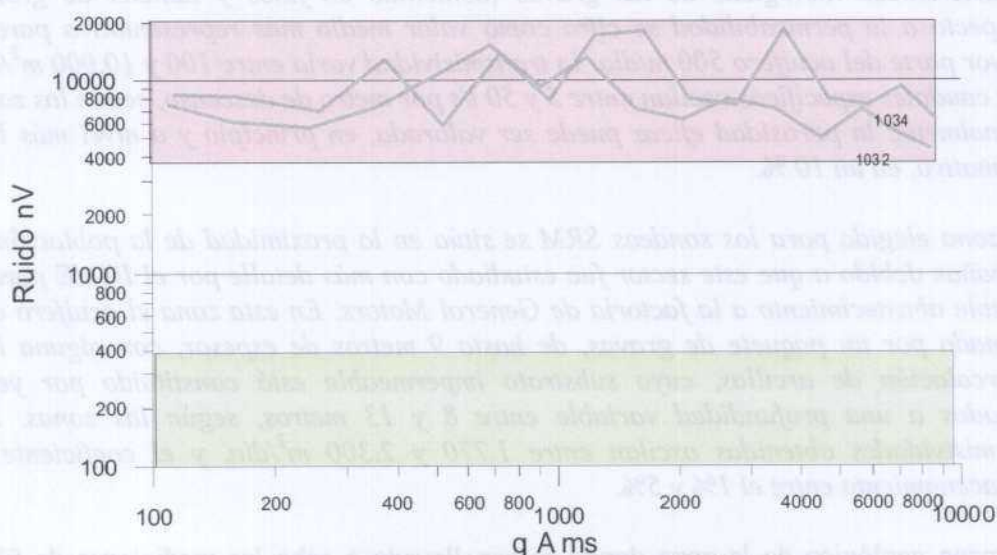
B: intensidad media del campo magnético terrestre en el área de la antena el día de la medición en nT

Inc. B: máxima variación de B en el área de la antena

S/R: relación Señal/Ruido, obtenido tras el proceso de los datos (valor indicativo, que puede diferir según los parámetros de proceso seguido)

Cali: estimación subjetiva de la calidad final del SRM, en una escala de MB B R M MM

Su situación se indica, sobre fotografía aérea, en la Figura 27, y con detalle de la disposición de las antenas en el **ANEXO VII-B**. En ambos casos se ha utilizado una antena en forma de ocho, con lado de 50 m, suficiente para la profundidad de investigación planteada y necesaria para tratar de amortiguar el alto nivel de ruido encontrado en la zona (Figura 28), el mayor de todas las áreas contempladas en este Informe (ver Figura 5).



Ruido ambiental: Ebro (Cabañas)

Figura 28 Ruido ambiental medido en los SRM de la zona del Ebro (Cabañas)

PLANO DE UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DONDE SE HAN REALIZADO SRM EN EL ALUVIAL DEL EBRO

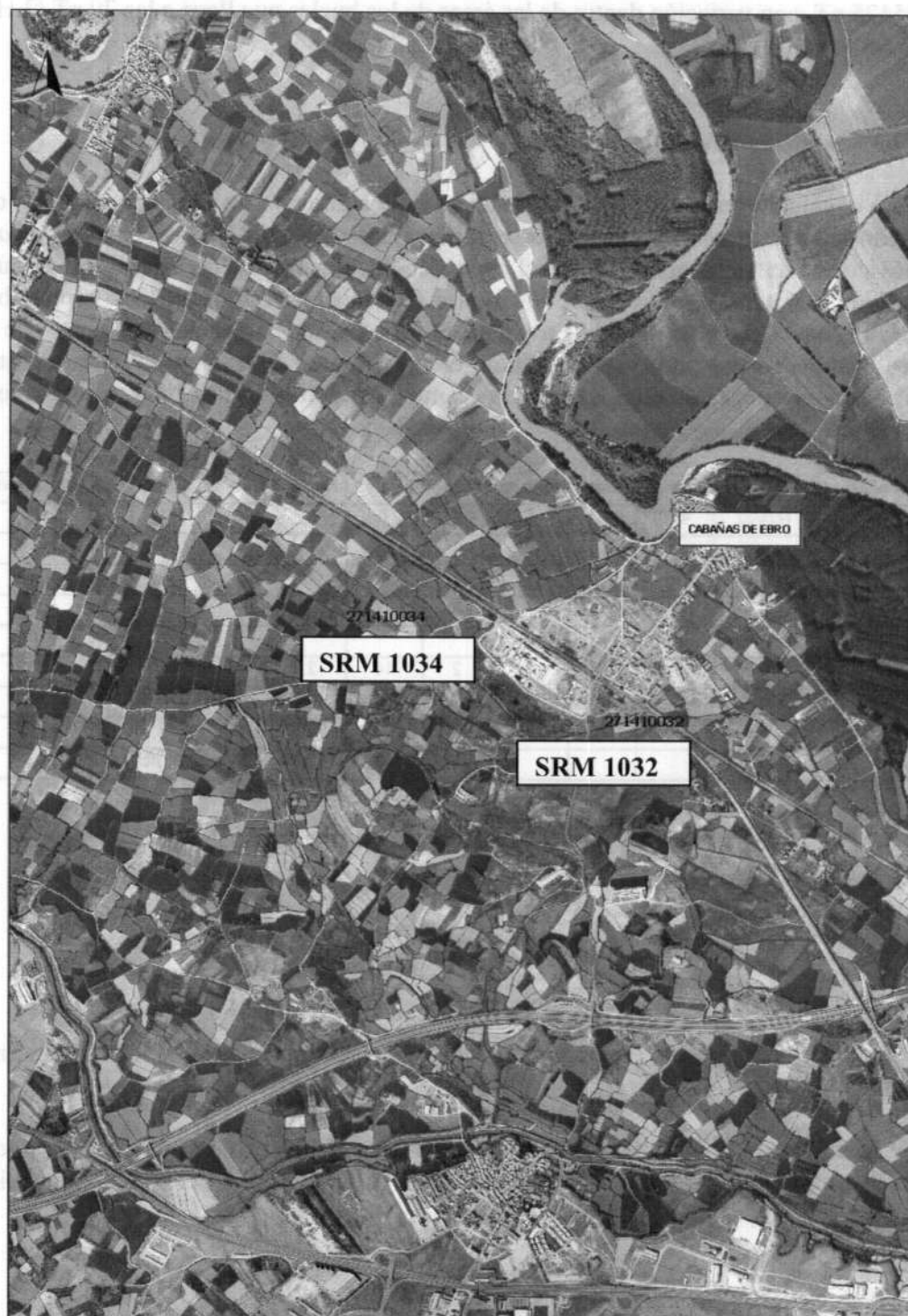


Figura 27 Situación de los SRM en la zona del EBRO (Cabañas). Hoja 1:50.000 n° 354

A pesar del elevado stacking utilizado, la relación señal/ruido obtenida es inferior a 1 y la calidad total resultante es bastante mala; las amplitudes máximas de la señal medida alcanzan, no obstante, más de 200 nV. El campo magnético terrestre es del orden de 45125 nT, con variación dentro de las áreas de los bucles que llega a las 70 nT (3 Hz) en el SRM 1032.

12.3 Matriz de Inversión

Para el cálculo de la matriz de inversión se ha contado con los datos procedentes de los informes: “*Prospección eléctrica sobre los ríos Ebro, Gallego, Jalón, Arba*” de noviembre de 1978, archivado en el centro de documentación del IGME con el número 40174, y “*Estudio geofísico en el área de Figueruelas (Zaragoza)*” de septiembre de 1979, con el número 40183. En estos informes se describen las campañas de SEV realizadas en estos años para el estudio hidrogeológico de esta zona. La interpretación de los SEV próximos a los sondeos mecánicos en donde se han realizado las medidas SRM es:

Sondeo	Nºinventario	ohm.m	poten	ohm.m	poten	ohm.m	Poten	ohm.m	poten	Ohm.m	poten
1032	2714/1/32	400	8	6	2	7	2	8	4	3	2
		40	17	80	20	49	6	75	28	112	4
		15		20		17	4	30		18	10
						42	18			98	32
1034	2714/1/34	14	2	19	2	14	2	45	4	40	2
		70	38	95	16	70	10	90	22	850	2
		19		40		29	48	15		30	56
						48				120	

De donde se ha obtenido el siguiente modelo general de la zona:

φ (Ω m)	E (m)
15	4
50	45
20	

En los perfiles geoeléctricos se aprecia cómo el espesor del resistivo intermedio disminuye cerca del sondeo 1034.

Se ha calculado la matriz **caba850.mrm**, para una antena en ocho de 50 m de lado, que es la utilizada en todos los SRM de esta zona, con inclinación del campo magnético de 55° y frecuencia de resonancia de 1922 Hz.

12.4 Interpretación

El nivel de ruido de esta zona es muy elevado, superando los 10000 nV (Figura 28 y Figura 5). A pesar de haber utilizado una antena en ocho y un elevado número de adición de señales, los resultados son de mala calidad, con caótico comportamiento de la frecuencia y de la fase, espectros sin señal destacada, y con relación S/R de 0.7. Los parámetros de proceso utilizados se sintetizan en el siguiente cuadro:

proceso de datos de SRM zona del EBRO (Cabañas)						
SRM	r.a.f. time conts. ms	S/N	error ajuste %	p.regularización.cpx	observaciones.	
1032	15	0,7	17	950	2,54E-07	
1034	15	0,7	9,8	1014	2,54E-07	

TablaProcesoEBRO

No se ha empleado ningún filtro Notch, debido a la superposición de señal y ruido de inducción. Como puede observarse, los errores de ajuste son elevados. Los gráficos con las mediciones de campo y resultado de la inversión se encuentran recogidos en el **ANEXO VII-D**. En la Figura 29 se ofrecen los resultados de distribución del agua con la profundidad y el valor del parámetro T1.

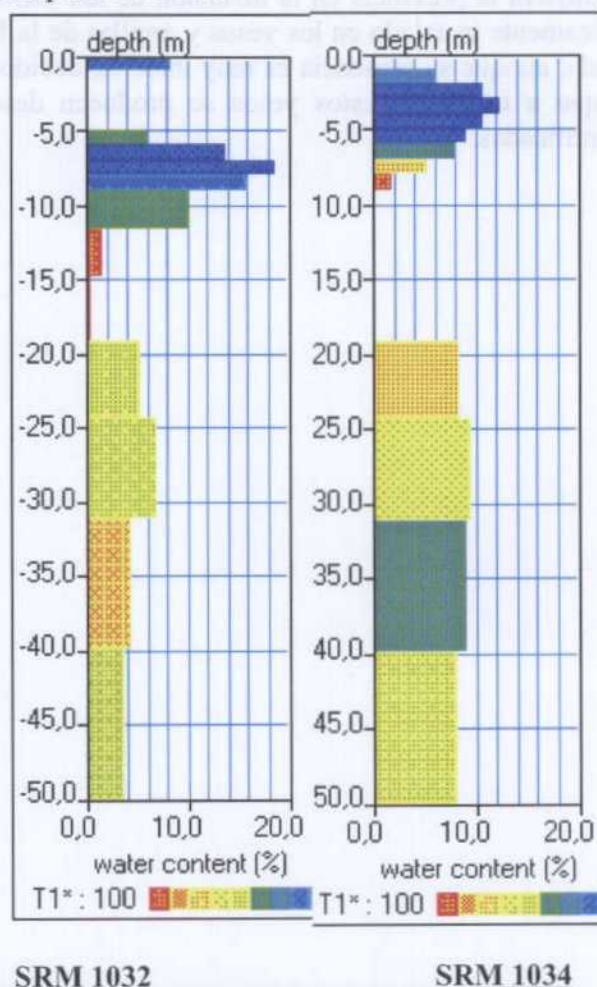


Figura 29 Interpretación de la distribución del contenido en agua y de T₁ (tamaño del grano) de los SRM medidos en la zona del Ebro (Cabañas)

Aunque la señal llega a los 200 nV y presenta cierta coherencia en algunos intervalos, debido al alto nivel de ruido y a su variación durante la ejecución de las mediciones, es dudoso que las curvas $E_0(q)$ se deban, o, al menos que estén reflejando bien, la señal del agua. En consecuencia, la única interpretación que cabe hacer de estos datos es meramente una aproximación cualitativa, indicando la posible existencia de una cantidad importante de agua en los primeros 10 m del subsuelo, que está en buena consonancia con los datos conocidos, ya que en estos emplazamientos hasta los 10-13 m existen gravas hasta el impermeable yesífero, situado a unos 9-13 m de profundidad.

A la existencia de un segundo acuífero según el resultado de la inversión de los datos, no puede darse ninguna fiabilidad, ya que para esos momentos de medición el ruido es muy superior a la señal (ver **ANEXO VII-D**). No obstante, es notable que los valores que alcanza el parámetro T1 están en muy buena consonancia con el tipo de materiales atravesados en toda la profundidad de los SRM.

Por lo tanto, en estos dos SRM de Cabañas se puede destacar lo bien identificado que aparece el acuífero aluvial a pesar de realizar los ensayos en una zona con elevado ruido ambiental. La porosidad máxima es muy superior a la del ensayo de bombeo, que dispone de piezómetro, quizá debido a que aquí, a diferencia del caso del Glera y del Campo de Cariñena, estamos en época de aguas altas inducida por los riegos estivales. También es llamativa la presencia en la inversión de los SRM de un segundo acuífero profundo, teóricamente instalado en los yesos y arcillas de la Fm. Zaragoza, que puede estar karstificada; aunque su presencia es muy incierta, debido al ruido existente, no se debe olvidar que a través de estos yesos se producen descargas de aguas salinas localmente identificadas.

12.5 Determinación de parámetros hidrodinámicos

Con la calidad de los datos de los SRM de esta zona no es realmente recomendable el intento de efectuar valoraciones de tipo cuantitativo; no obstante, dado el buen resultado cualitativo obtenido, se va a proseguir con la misma mecánica de evaluación de parámetros efectuada en las zonas anteriores.

El siguiente cuadro sintetiza la información suministrada por la oficina del IGME en Zaragoza, en diciembre de 2003, expresándose entre paréntesis el valor previamente facilitado para la transmisividad:

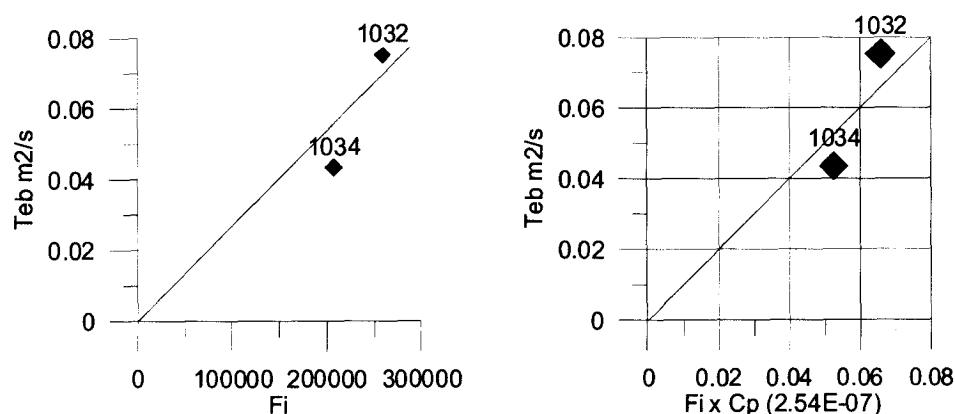
zona	srn	nº inventario	toponimia	x	y	z	prof	caudal l/s	Transm. m2/dia	n.pz.
Cabañas	1032	2714/1/32	Cabañas-1	652237	4627923	225	15	50	6500 [70000]	1770
Cabañas	1034	2714/1/34	Cabañas-3	650995	4628418	222	17		2500-5000	2300

entre paréntesis, información previa de la CHE; en azul información nov.2004
Tabla srmhidrauEBRO

Seleccionando solamente los resultados para el primer acuífero, dados con anterioridad a noviembre de 2004, se ha calculado el coeficiente de calibración $C_{pt}=2.54 \cdot 10^{-7}$ (cálculos en el ANEXO VII-E), que como puede apreciarse en la Figura 30, permite cierto ajuste con ambos sondeos. Con este valor se han calculado la permeabilidad y transmisividad, representadas en la Figura 31, que no son válidas más que de forma cualitativa y para el primer acuífero.

zona	SRM	Teb m2/dia	Teb m2/s	Fi	Intervalo z	Cp	Fi x Cp	Tsrm m2/d
Cabañas	1032	6500	0,07523	259268	0-1,5-15	2,90E-07	6,59E-02	5693,19
Cabañas	1034	3750	0,0434	207512	1-9,	2,09E-07	5,27E-02	4556,70
		suma Teb	suma Fi					
		0,11863	466780	Cpt		2,542E-07		

Tabla interpreEBRO(parcial)



Calibración de la Transmisividad en los SRM de la zona de CABAÑAS (EBRO)

Figura 30 Calibración de la transmisividad en la zona del Ebro (Cabañas)

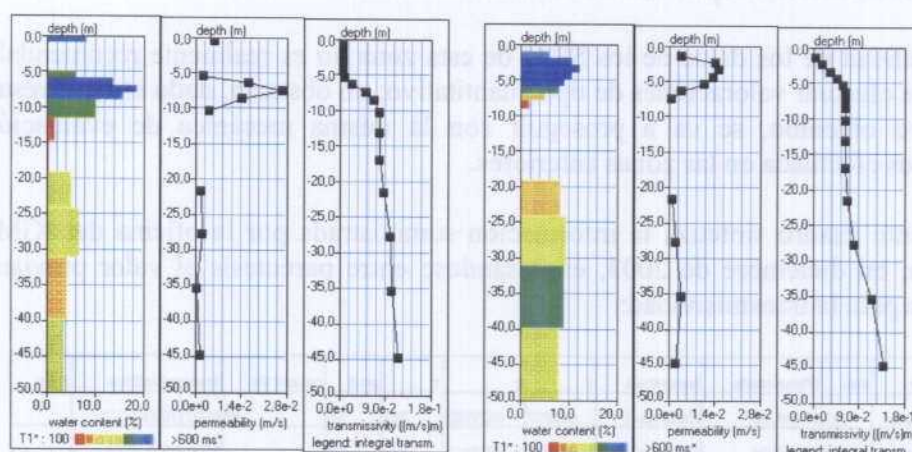
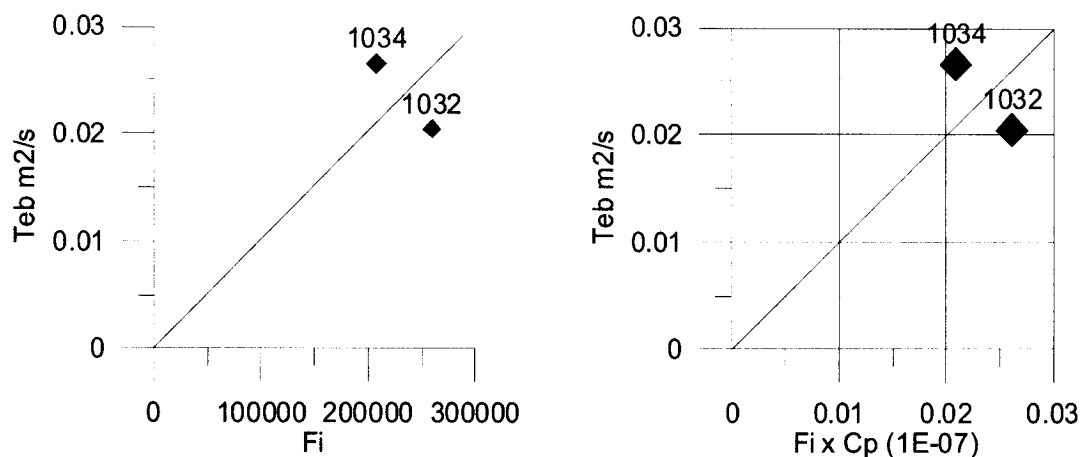


Figura 31 Resultados de permeabilidad y transmisividad acumulada en los SRM 1032 y 1034 del Ebro (Cabañas). Valores de alcance exclusivamente cualitativo, sólo válidos para el primer tramo acuífero.

Si se consideran los nuevos valores aportados para la transmisividad T_{eb} , se obtiene un coeficiente de calibración de $1E-07$:

zona	SRM	T_{eb} m²/día	T_{eb} m²/s	Fi	intervalo z	Cp	Fi xCpt	T_{srm} m²/d
Cabañas	1032	1770	0,02049	259268	0-1,5-15	7,90E-08	2,62E-02	2260,64
Cabañas	1034	2300	0,02662	207512	1-9,	1,28E-07	2,09E-02	1809,36
		suma T_{eb}	suma Fi					
			0,04711	466780	Cpt	1,009E-07		

Resultando los ajustes indicados en la Figura 32, de peor agrupamiento, y con los que los valores de transmisividad determinados por SRM se sitúan en 2260 y 1809 m²/día. Como ya se ha indicado varias veces en este Informe, la calibración depende de la fiabilidad de los valores tomados como referencia a través de ensayos de bombeo.



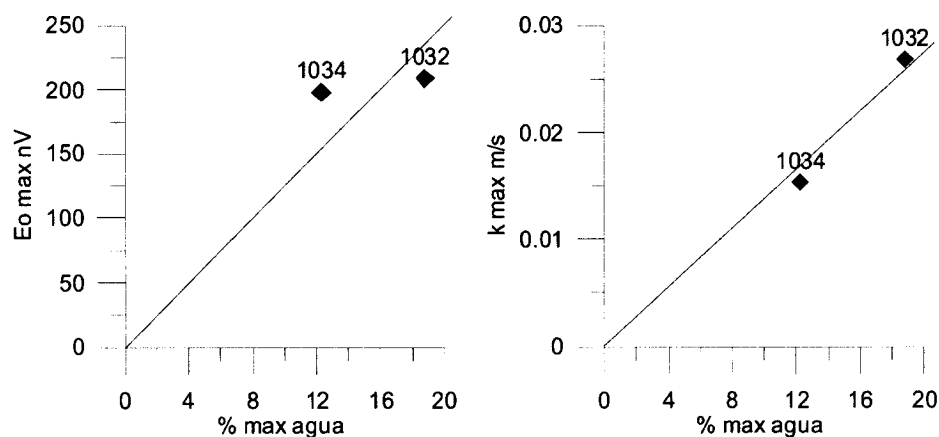
Calibración de la Transmisividad en los SRM de la zona del EBRO (Cabañas)

Figura 32 Calibración de la transmisividad en la zona del Ebro (Cabañas) con los nuevos valores aportados de T_{eb}

Así mismo, en la Figura 33 se presenta la correlación entre el máximo de porosidad (% en agua) calculado en los SRM, la máxima amplitud de señal medida, y el valor máximo de la permeabilidad calculada. A pesar de la muy mala calidad de los datos, no se aprecia dispersión de valores (no obstante, al tratarse sólo de dos valores, puede ser fruto de coincidencias).

zona	SRM	npz	npz SRM	caudal l/s	Eo max	T2*	% max	Permx	Tmax
Cabañas	1032		5	50	209	296	18,8	0,026833	0,0268332
Cabañas	1034		1		198	443	12,3	0,015329	0,03417634

Tabla interpreEBRO (parcial)



Relaciones entre los parámetros determinados por SRM en la zona del EBRO (Cabañas)

Figura 33 Correlación entre parámetros determinados por SRM en la zona del Ebro